



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**URČENÍ LOKALIZACE DRONU POMOCÍ NAVIGAČ-
NÍCH SYSTÉMŮ**

DETERMINING OF DRON LOCALIZATION USING NAVIGATION SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN NOSÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Prof. Ing., Dipl.-Ing. MARTIN DRAHANSKÝ, Ph.D.

BRNO 2018

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Nosál Jan**

Obor: Informační technologie

Téma: **Určení lokalizace dronu pomocí navigačních systémů**
Determining of Dron Localization Using Navigation Systems

Kategorie: Umělá inteligence

Pokyny:

1. Seznamte se s nejpoužívanějšími navigačními systémy a zpracujte přehled vlastností, které charakterizují jednotlivé systémy.
2. Popište způsob využití navigačních systémů u dronů.
3. Navrhněte způsob zpracování dat z modulu pomocí kontroléru.
4. Provedte testy jednotlivých navigačních systémů a dosažené výsledky shrňte.

Literatura:

- Groves P.D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. GNSS Technology and Applications Series, 2nd Edition, Artech House, 2013, ISBN 978-1-60807-005-3.
- Evans B. *Beginning Arduino Programming*. Technology in Action, 2011, ISBN 978-1-4302-3777-8.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Drahanský Martin, prof. Ing., Dipl.-Ing., Ph.D., UITS FIT VUT**

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
602 00 Brno, Božetěchova 2

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou lokalizace dronu pomocí navigačních systémů, se kterými jsou schopny pracovat navigační moduly, které byly testovány. Dále je řešena problematika záznamu dráhy letu a určení náklonu a směru letu dronu. Drony se stávají stále populárnějšími zařízeními, která jsou používána pro vojenské, zemědělské a především pro komerční účely. Tato práce shrnuje informace o nejvyžívanějších navigačních systémech, se kterými se setkáváme každý den, a to především v automobilech a letadlech. Pro řešení problematiky lokalizace dronu byly testovány dva navigační moduly. Moduly jsou schopny pracovat s až pěti navigačními systémy, a to GPS, Glonass, Galileo, Beidou a QZSS a zároveň dokáží komunikovat s mikrokontrolérem Arduino a IMU jednotkou pro určení pozice dronu.

Abstract

The thesis describes problems of drone navigation using navigation systems with which the navigation modules that have been tested are able to work. Next the issue with flight path and the determination of the incline and direction of the flight of the drones was solved also. Drones are more and more popular devices used for military, agricultural and commercial purposes. The thesis contains information about most used navigation systems which we encounter every day especially in cars and aircrafts. There were tested two navigation modules for drone localization. Modules capable of handling five navigation systems GPS, Glonass, Galileo, Beidou, QZSS and they can communicate with the Arduino board and IMU controller for drone positioning.

Klíčová slova

navigace, navigační systémy, arduino, GPS, Glonass, Beidou, Galileo, dron, kvadrokoptéra, měření přesnosti, pozice dronu, IMU, NMEA

Keywords

navigation, navigation systems, arduino, GPS, Glonass, Beidou, Galileo, drones, quadcopter, accuracy measurement, drone position, IMU, NMEA

Citace

NOSÁL, Jan. *URČENÍ LOKALIZACE DRONU POMOCÍ NAVIGAČNÍCH SYSTÉMŮ*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martin Dražanský, Ph.D.

URČENÍ LOKALIZACE DRONU POMOCÍ NAVIGAČNÍCH SYSTÉMŮ

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martin Drahanský, Ph.D. Další informace mi poskytl Ing. Tomáš Goldmann. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Jan Nosál

28. dubna 2018

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martinu Drahanskému, Ph.D. za odborné vedení mé práce, Ing. Tomášovi Goldmannovi za pomoc se zprovozněním a poskytnutím potřebných zařízení. Zároveň bych chtěl poděkovat mé rodině za poskytnutí podpory během studia.

Obsah

1	Úvod	5
2	Navigace	7
2.1	Historické typy navigace	7
2.1.1	Astronavigace	7
2.1.2	Navigace pomocí orientačních bodů	7
2.1.3	Navigace výpočtem	8
2.1.4	Rádiová navigace	8
2.2	Globální družicový polohový systém - GNSS	8
2.3	Princip družicové navigace	9
2.3.1	Úhloměrná metoda	9
2.3.2	Dopplerovská metoda	10
2.3.3	Fázová metoda	10
2.3.4	Kódová metoda	10
2.4	Struktura GNSS	10
2.4.1	Kosmický segment GNSS	10
2.4.2	Řídicí segment GNSS	11
2.4.3	Uživatelský segment GNSS	11
2.5	Systém GPS	11
2.5.1	Historie GPS	11
2.5.2	Současnost GPS	12
2.5.3	Kosmický segment systému GPS	12
2.5.4	Řídicí segment systému GPS	13
2.5.5	Uživatelský segment systému GPS	13
2.6	Systém Glonass	14
2.6.1	Historie Glonass	14
2.6.2	Současnost Glonass	14
2.6.3	Kosmický segment systému Glonass	14
2.6.4	Řídicí segment systému Glonass	15
2.6.5	Uživatelský segment systému Glonass	15
2.7	Systém Galileo	16
2.7.1	Historie Galileo	16
2.7.2	Současnost Galileo	16
2.7.3	Kosmický segment systému Galileo	16
2.7.4	Řídicí segment systému Galileo	17
2.7.5	Uživatelský segment systému Galileo	18

2.7.6	Služby systému Galileo	18
2.8	Systém Beidou/Compass	19
2.8.1	Historie Beidou/Compass	19
2.8.2	Současnost Beidou/Compass	19
2.8.3	Kosmický segment systému Beidou/Compass	20
3	Drony	21
3.1	Vývoj	21
3.2	Základní komponenty dronů	21
3.2.1	Rám	21
3.2.2	Řídicí jednotka	22
3.2.3	Rotory a vrtule	23
3.2.4	Regulátory motorů	24
3.2.5	Akumulátor	24
3.3	Senzory pro snímání polohy	25
3.3.1	Magnetometr	25
3.3.2	Gyroskop	25
3.3.3	Akcelerometr	25
3.3.4	Senzory pro navigační systémy	26
3.4	Použití navigačních systémů u dronů	26
3.4.1	Waypoints	27
3.4.2	Diferenční systémy	27
3.4.3	RTK (Real Time Kinematic)	28
4	Použité součásti pro realizaci	30
4.1	Arduino	30
4.1.1	Hardware Arduino	30
4.1.2	Vývojové prostředí Arduino	31
4.2	Arduino Due	31
4.3	GPS moduly	32
4.4	Arduino gyroskop a akcelerometr	32
4.4.1	IMU	32
4.4.2	MPU-6050	32
4.5	Modul pro SD kartu	33
4.6	Prolific PL2303TA	34
5	Statické testování GNSS systémů a GNSS modulů	35
5.1	U-Blox MAX-M8Q	36
5.2	U-Blox NEO-M8N	38
5.3	Určení výšky navigačních modulů	41
5.4	Využití satelity při testování	42
5.5	Dynamické testování modulů	42
6	Popis systému	45
6.1	Princip systému	46
6.2	Navigační modul	47
6.2.1	Protokol NMEA 0183	47

6.2.2	Formát a datový rámec přenášených dat	47
6.2.3	Komunikace s navigačním modulem	48
6.3	Komunikace s MPU6050	48
6.3.1	Filtrování hodnot z akcelerometru	49
6.4	Modul pro SD kartu	49
6.4.1	Formát a výstup dat do souboru	49
6.4.2	Formát snímaných dat	50
6.5	První let	50
6.6	Druhý let	51
6.7	Třetí let	52
7	Závěr	54
	Literatura	56
	Přílohy	60
A	Obsah CD	61

Seznam obrázků

2.1	Užívaná pásma a nominální frekvence GNSS. [35]	9
2.2	Rozmístění družic systému GPS. [27]	13
2.3	Poloha družic systému Glonass v roce 2017. [26]	15
2.4	Poloha družic systému Galileo v roce 2017. [7]	17
2.5	Poloha družic systému Beidou v roce 2016. [34]	20
3.1	Rám kvadrokoptéry DJI F450. [2]	22
3.2	Řídicí jednotka pro DJI Phantom 4. [3]	23
3.3	Střídavý motor s vrtulí. [13]	24
3.4	Střídavý regulátor ESC 20 A. [4]	24
3.5	Akumulátor G3 RAY Li-Pol 3000 mAh. [5]	25
3.6	Princip funkce systému DGPS.	27
3.7	Ilustrace fungování RTK.	29
4.1	Gyroskop s akcelerometrem pro Arduino. [12]	33
4.2	Modul pro SD kartu. [1]	34
4.3	USB konvertor PL2303TA. [8]	34
5.1	GPS modul u-blox MAX-M8Q. [9]	36
5.2	Určení statické pozice modulu pomocí GPS.	37
5.3	Určení statické pozice modulu pomocí GPS a Glonass.	38
5.4	GPS modul u-blox NEO-M8N. [10]	39
5.5	Určení statické pozice modulu pomocí GPS.	40
5.6	Určení statické pozice modulu pomocí GPS a Glonass.	40
5.7	Určení nadmořské výšky modulů.	41
5.8	Počet využitých GNSS satelitů moduly.	42
5.9	Trasa pro testování modulů v pohybu.	43
5.10	Porovnání přesnosti modulů v pohybu.	43
6.1	Grafický výstup z Google Earth.	46
6.2	Schéma zapojení.	47
6.3	První zkušební let.	51
6.4	První zkušební let a zobrazení výšky.	51
6.5	Druhý zkušební let s funkcí <i>waypoints</i> .	52
6.6	Třetí zkušební let s funkcí <i>course lock</i> .	53

Kapitola 1

Úvod

Dějiny navigace se začaly tvořit už v evropském středověku, kdy se stala nedílnou součástí každodenního života. Lidé se postupem času učili zaznamenávat své cesty a významná místa na Zemi pomocí značek v přírodě, stromů, hor, a stávaly se tak orientačními body pro navigaci. Postupem času přestávaly lidem tyto “orientační body” stačit a začalo docházet k jejich zaznamenávání a zpracování z důvodu větší přesnosti, kterou člověk pro svoji orientaci potřeboval. Pokroky s vývojem navigace přetrvávají dodnes a jsou vytvářeny stále náročnější metody a přístroje pro její zdokonalování. Navigace se nejvíce zaměřuje na zemský povrch, který je v dnešní době téměř celý zmapovaný, výjimky však tvoří jeskyně, mořské příkopy apod.

Moderní systémy dnešní doby nám umožňují určování polohy v reálném čase s přesností na centimetry. Jediným problémem těchto systémů je, že musí mít přímou viditelnost oblohy, kde jsou na oběžných drahách umístěny družice navigačních systémů.

Tyto systémy byly vyvinuty v polovině minulého století, kdy byl vytvořen první satelitní navigační systém Transit, který později sloužil k vytvoření nejznámějšího a nejrozšířenějšího navigačního systému a to systému GPS – globální poziční systém, na který navazují ruský systém Glonass, evropský Galileo a čínský Beidou (Compass). Všechny tyto GNSS systémy jsou dnes běžně dostupné pro civilní obyvatelstvo. Nejčastěji se používají v turistice, v mobilních telefonech, v automobilech a mnoha dalších zařízeních, kde však přesnost systémů není tak velká a může způsobovat odchylku až desítky metrů.

Dnešní trh nabízí celou řadu přijímačů, které komunikují s různými druhy GNSS. V této práci bylo zapotřebí zvolit senzor, s co největší přesností, ale důležitým faktorem výběru byla i hmotnost a velikost samotného modulu. V tomto případě byl ale zvolen větší modul, který splňoval požadavky na větší přesnost.

Cílem této práce je prostudovat nejznámější navigační systémy a otestovat jejich přesnost dat, které budou použity pro dron k určení, co nejpřesnější pozice a zaznamenání dráhy letu. V tomto projektu byla k implementaci použita vývojová deska Arduino a navigační senzory U-Blox NEO-M8N a U-Blox MAX-M8Q. Druhá kapitola této práce popisuje jednotlivé navigační systémy, které byly v této práci zkoumány a testovány. Kapitola je zaměřena na historii, vývoj a jednotlivé segmenty GNSS. Další kapitoly popisují komponenty dronu a využití navigačních systémů při létání, samotný návrh a implementaci algoritmů pro realizaci tohoto projektu.

Jelikož se jedná o novou problematiku neexistuje moc odborných článků a publikací, které by se podrobněji zabývaly technologií bezpilotních letounů.

Kapitola 2

Navigace

Navigace je souhrnný název pro postupy, jimiž lze kdekoliv na zeměkouli, moři či obecně v nějakém prostoru (ještě obecněji v nějaké situaci) stanovit svou polohu (nebo polohu jiného přemísťovaného objektu) a nalézt cestu, která je podle zvolených kritérií nejvhodnější (například nejrychlejší, nejkratší atd.). Termín je odvozen z latinského slova *navis* znamenajícího loď. Původně tento termín definoval plavbu po moři, význam se metonymicky přenesl na zjišťování polohy, směru, volbu trasy a metaforicky pak rozšířil na další druhy dopravy a další činnosti. Postupem času se navigace začala dělit na několik metod, které byly založeny na různých principech – astronavigace, navigace pomocí orientačních bodů, navigace výpočtem, radiová navigace, inerciální navigace. [36]

2.1 Historické typy navigace

2.1.1 Astronavigace

Pro řešení problému navigace, byla jako první použita hvězdná obloha, Slunce a hvězdy jako přirozené orientační body. Pro elevaci mimozemských objektů se používal přístroj sextant, který sloužil pro měření úhlové vzdálenosti dvou těles nebo úhlu výšky mimozemských těles nad horizontem. Princip této navigace vychází z toho, že vzájemná poloha těles a jejich uspořádání je různá z různých míst na Zemi.

Astronavigace se v průběhu vývoje lidstva zdokonalila na tolik, že můžeme určit polohu na Zemi pomocí kosmických těles s přesností na 30 m. Nevýhodou této navigace je, že měřicí metody a přístroje určují polohu příliš dlouho. [32]

2.1.2 Navigace pomocí orientačních bodů

Pro navigaci pomocí orientačních bodů je specifické, že daný prostředek využívá body, které jsou buď přírodního původu (hory, skály, lesy, jezera apod.) nebo se jedná o body, které byly vytvořeny uměle člověkem (stavby, majáky, věže a další). Princip této navigace je v tom, že se prostředek pohybuje daným směrem k orientačnímu bodu, po uražení určité vzdálenosti se vybere další orientační bod atd. dokud prostředek nedosáhne cíle. Ne vždy je určitým směrem nalezen vhodný orientační bod, a proto je možné se pohybovat např. pod úhlem třiceti stupňů od orientačního bodu.

S touto navigací úzce souvisí termín azimut. Azimut lze definovat jako úhel, který ve vodorovné rovině svírá určitý směr se směrem severním. Jedná se tedy o odměřování úhlu od jednoho orientačního bodu – severního pólu. Sever má azimut 0° , východ 90° , jih 180° a západ 270° . [37]

2.1.3 Navigace výpočtem

U tohoto druhu navigace bylo důležité si vést záznamy o pohybu, aby bylo možné určit polohu tělesa popř. dopravního prostředku a bylo vhodné k tomu použít orientační body. Od orientačních bodů se zaznamenával směr pohybu a vzdálenost pomocí bodů v mapě a byly označovány daným časem, ke kterému se vztahovaly. Výpočty probíhají rekurzivně vždy, když se podaří jinými prostředky získat polohu dopravního prostředku nebo tělesa. Při této navigaci je důležitá navigační linie, která udržuje informace o poloze prostředku a jaký je aktuální směr pohybu.

Tento typ navigace není příliš spolehlivý, protože využívané prostředky pro navigaci neudávají reálný směr, ale jenom směr, kterým je dopravní prostředek natočen, což dále ovlivňují další vlivy jako je vítr, proudy atd. [23]

2.1.4 Rádiová navigace

Tato navigace už patří k moderním a pokročilým navigačním prostředkům, u kterých jsou používány rádiové vlny a fyzikální zákony. Těmto navigačním prostředkům se budeme věnovat v následujících kapitolách. [23]

2.2 Globální družicový polohový systém - GNSS

Globální družicový polohový systém (*Global Navigation Satellite System*) je systém, který umožňuje autonomní prostorové určení polohy pomocí sítě družic s celosvětovým pokrytím. Uživatelé GNSS používají elektronické rádiové přijímače různých velikostí, které pomocí odeslaných signálů z družic dekodují signál a jsou schopny vypočítat polohu senzoru s přesností na centimetry až milimetry (určují zeměpisnou délku, šířku a výšku). Za posledních několik let došlo ke zvýšení popularity bezpilotních letounů jako jsou drony (kvadrokoptéry), které se začínají používat k různým aktivitám v průmyslu, armádě, v záchranářském sektoru, ale především pro komerční používání (např. policejní hlášení, k vyhlášení požárů, záchrana lidí, průzkum terénu pro mapové podklady nebo natáčení a fotografování) a také pro vědecké účely.

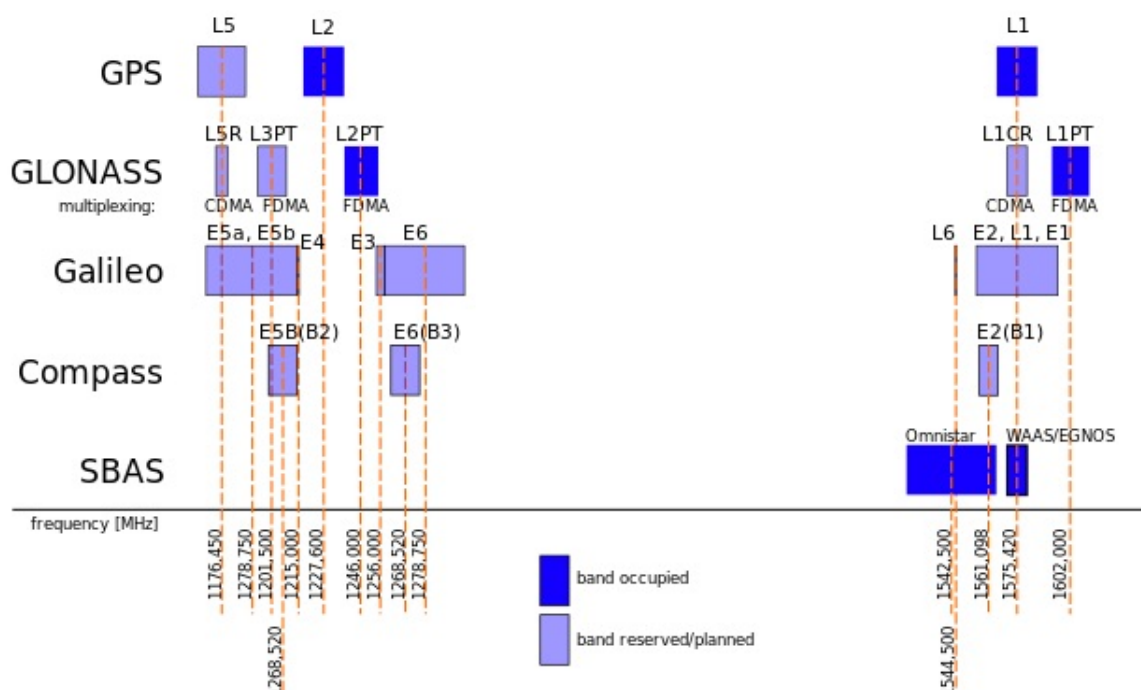
Bezpilotní letouny (drony/kvadrokoptéry) ve většině případů používají právě moduly s technologií GNSS, díky kterým mají možnost přesné lokalizace dané polohy nebo mohou využívat autonomní navigaci. Míra přesnosti výpočtu polohy je závislá na aplikaci dronů a záleží na výběru a kombinaci GNSS.

Nejstarším a nejrozšířenějším navigačním systémem je americký systém Navstar GPS, který začaly používat americké vzdušné síly a námořnictvo. S postupným vývojem navigačních systémů stoupal počet zneužití těchto systémů a proto USA v roce 1990 zavedly opatření nazývané „selektivní dostupnost“, která měla zajistit, že do rádiového signálu uměle přidávala chybu. To mělo zabránit jejich zneužívání např. při použití balistických střel. Roku 2000 byla však selektivní dostupnost zrušena, jelikož systém byl vyvinut tak, aby zaručil signál pouze na dané území, po jeho zrušení se

přesnost měření několikanásobně zvýšila. Za pár let hned následoval vývoj sítě ruských družic Glonass. Dnes jsou tyto systémy doplňovány dalšími dvěma systémy a to evropský Galileo, který doplňuje předešlé navigační systémy a díky tomu zajišťují vysokou spolehlivost a přesnost v letecké dopravě. Čtvrtým nejznámějším systémem je čínské Beidou.

Díky těmto systémům je zjišťování polohy volně dostupné pro veřejnost pomocí přijímačů GNSS. Navigační systémy dnes neodmyslitelně patří k mobilním telefonům, automobilům, zemědělství a mnoho dalších segmentů. Další navigační systémy vyvíjí také Japonsko a Indie. [18]

Na obrázku č. 2.1 lze vidět použití užívaných pásem a frekvencí GNSS.



Obrázek 2.1: Užívaná pásma a nominální frekvence GNSS. [35]

2.3 Princip družicové navigace

Pro určování polohy se používají následující metody:

- úhломěrná metoda,
- dopplerovská metoda,
- fázová metoda,
- kódová metoda

2.3.1 Úhломěrná metoda

Tato metoda se už kvůli své komplikovanosti a nepřesnosti nepoužívá. Principem je zaměřování družice a určení elevačního úhlu z objektu, u kterého zjišťujeme polohu.

Geometrickým místem bodů s elevačním úhlem je kužel s vrcholem v místě družice. Budeme-li provádět měření ke stejné družici nebo k jiné družici získáme druhý kužel. Průsečnicí těchto kuželů s povrchem Země, případně s výškovou hladinou v nichž se objekt nachází se protínají v místě námi hledané polohy. [18]

2.3.2 Dopplerovská metoda

Metoda pracuje na principu Dopplerova posunu, který zjišťuje změny frekvence pohybujícího se zdroje signálu vůči pozorovateli. Frekvenční posun je po danou dobu zaznamenáván a následně se zpracovává a počítá se změna radiální vzdálenosti. Z radiální vzdálenosti lze zjistit polohu, ale převážně je používána pro určení rychlosti přijímače. [31]

2.3.3 Fázová metoda

U fázového měření se nepoužívají dálkoměrné kódy jako je tomu u kódové metody, ale používají se nosné frekvence respektive její vlastnosti. Principem metody je počítání vlnových délek nosné frekvence mezi přijímačem a družicí. Měření je velmi přesné, ale nejednoznačné z důvodu neznámého počtu vln na počátku měření. [31]

2.3.4 Kódová metoda

Pro kódové měření se využívají dálkoměrné kódy (časové značky), které vysílají jednotlivé družice a jejím základem je určit vzdálenost mezi přijímačem a družicí. Dálkoměrné kódy (časové značky) určují čas vysílání. Metoda pracuje tak, že je ze vstupního signálu z antény zjištěn dálkoměrný kód, čas vysílání a příjem signálu. Vzdálenost se vypočítá pomocí rozdílů časů. Pro měření jsou použity pouze ty družice, které jsou nad obzorem mezi 5° a 10° . [31]

2.4 Struktura GNSS

Všechny GNSS, které jsou v této práci představeny se skládají ze třech systémových částí: [14]

- kosmický segment,
- řídicí segment,
- uživatelský segment

2.4.1 Kosmický segment GNSS

Do kosmického segmentu je umístěno několik desítek družic a jsou umístěny na oběžné dráze Země. Družice se pohybují po předem známých oběžných drahách a jsou vybaveny vysílači a přijímači s přesnými atomovými hodinami. Pohyb družic je po nějakém čase vychýlen z dráhy a dochází k nepřesnosti v měření. GNSS systémy se v kosmickém segmentu liší počtem družic a počtem skladeb signálů, které jsou družicemi vysílány. Kosmický segment se snaží, co nejlépe pokrýt zemský povrch signály z družic. [29]

2.4.2 Řídicí segment GNSS

Řídicí segment zajišťuje řízení celého navigačního systému a je umístěn na Zemi. Tento segment řídí a kontroluje kosmický segment a zasílá řídicí signály pro směřování družic a údržbu atomových hodin. Skládá se z jedné řídicí stanice a z monitorovacích stanic, které přijímají data z družic a díky nim může řídicí stanice korigovat polohu a čas, aby se kompenzovaly nepřesnosti od predikovaných drah. [29]

2.4.3 Uživatelský segment GNSS

Do uživatelského segmentu patří samotní uživatelé GNSS, kteří jsou schopni pomocí přijímačů určovat polohu, rychlost, čas a zrychlení. Uživatelský segment dostává zprávy od řídicího segmentu, který ho informuje o stavu kosmického segmentu pomocí komunikačních kanálů jako je web nebo email. [29]

2.5 Systém GPS

2.5.1 Historie GPS

Systém GPS byl vyvinut během poloviny dvacátého století primárně pro účely námořního letectva a dodnes je pod správou ministerstva obrany USA. Během roku 1960 byla vypuštěna na oběžnou dráhu síť družic Transit, které sloužily pro určování polohy systému GPS. O pár let později byl tento systém poskytnut pro civilní použití. Počátkem 70. let bylo vydáno memorandum ministerstvem obrany USA, které přidělilo další vývoj systému vzdušným silám. Vojenské a námořnické složky vyvíjely systém odděleně a proto byly tyto projekty sloučeny do jednotného programu NAVSTAR – GPS.

Projekt probíhal v několika etapách. V první etapě, která probíhala v letech 1973 – 1979 se prováděly převážně pozemní testy, které ověřovaly možnosti třírozměrné navigace a probíhal výběr partnerů pro výrobu družic a technických zařízení. Koncem roku 1978 byly nasazeny už čtyři družice, které umožňovaly trojrozměrnou navigaci. Testování probíhalo na polygonu v Arizoně, kde byly umístěny pozemní vysílače, které pomáhaly simulovat budoucí družice. Koncem roku bylo v provozu téměř 11 družic a byly označeny jako družice I. bloku.

Druhá etapa probíhala v letech 1979 – 1985 a zaměřovala se převážně na budování řídicích středisek. V roce 1980 byla zahájena výroba družic II. bloku, který měl obsahovat výrobu a vývoj dalších 28 družic. Pro testování prototypů přijímačů byl opět využit polygon, ale také námořnictvo, které je využilo pro svoje operace.

Desátá až dvacátá osmá družice bloku II jsou označovány jako družice IIA, které byly schopny pracovat po dobu 180 dní bez kontaktu s řídicím střediskem. Blokem IIR je nazýváno dalších 20 družic, které vyrobila firma General Electric a jsou schopny autonomní činnosti a dokáží mezi sebou komunikovat a zajišťovat svoji polohu. Rok 1993 byl významným milníkem ve vývoji, jelikož bylo možné trojrozměrné navigace kdekoli na Zemi po dobu 24 hodin. 3.3. 1994 nastal tzv. operační stav, kdy bylo v provozu všech 24 družic typu II na oběžné dráze a budování systému GPS bylo považováno za ukončené. [20]

2.5.2 Současnost GPS

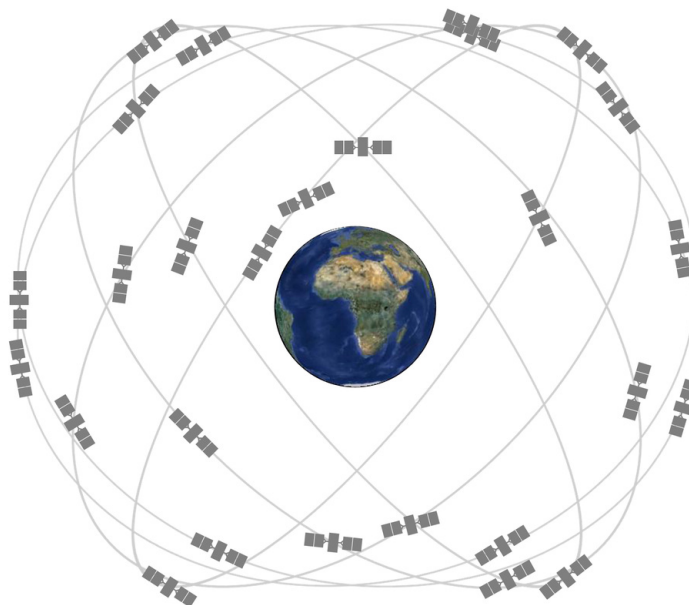
GPS je v současnosti jediný plně funkční navigační systém na světě a je to pravděpodobně zapříčiněno vysokými náklady na vybudování a správu. Dnes je systém rozdělen na 3 segmenty – kosmický, řídicí a uživatelský. Kosmický segment obsahoval původně 24 družic, ale dnes je využíváno až 32 družic, které jsou umístěny asi 20 350 km nad Zemí. Řídicí segment se skládá ze čtyřech částí a jeho úkolem je zasílat příkazy družicím a provádět jejich manévry a správu atomových hodin. V uživatelském segmentu uživatelé přijímají data z družic, na které mají dohled. Díky údajům a parametrům z družic přijímač spočítá pozici antény, nadmořskou výšku a zobrazí GPS datum a čas.

V současné době se tedy jedná o nejlepší standard pro civilní a vojenské aplikace a můžeme se s ním setkat téměř kdekoli např. v automobilech, lodích, letadlech a další. Do budoucna se počítá s možností rozšíření o další kanály pro civilní letectví a armádu. [20]

2.5.3 Kosmický segment systému GPS

Jak už bylo řečeno kosmický segment systému GPS se skládá z 24 družic a jejich mezní počet je 32, které jsou rovnoměrně rozloženy v šesti kruhových oběžných drahách se sklonem 55° . Tyto dráhy jsou mezi sebou posunuty o 60° . Jednotlivé dráhy obsahují nejméně čtyři satelity, které nejsou rozmístěny rovnoměrně, ale jsou mezi nimi úhlové rozdíly rozloženy a to přibližně 30° , 106° , 120° a zbylých 104° . Díky tomuto rozložení družic lze minimalizovat omezení přesnosti určení polohy, pokud dojde k výpadku jedné z družic. Rozmístění oběžných drah je navrženo tak, aby alespoň 6 družic bylo viditelných z jakéhokoli místa na Zemi.

Každá družice je vybavena čtyřmi velmi přesnými atomovými hodinami s cesiovým nebo rubidiovým oscilátorem. Tyto oscilátory zajišťují dlouhodobou stabilitu frekvence vysílaného signálu. Družice ke komunikaci se stanicemi řídicího segmentu a dalšími družicemi využívají několik antén v pásmech S, UHF a L. Pásmo S je využíváno pro komunikaci s kontrolními stanicemi na frekvenci 2 204,4 MHz. Pro vzájemnou komunikaci mezi družicemi je použito pásmo UHF (česky UKV). A nakonec je použito pásmo L, které vysílá navigační signály a operuje na frekvencích 1 000-2 000 MHz. Obrázek č. 2.2 zobrazuje aktuální rozmístění satelitů systému GPS. [30]



Obrázek 2.2: Rozmístění družic systému GPS. [27]

2.5.4 Řídicí segment systému GPS

Jak už z názvu vyplývá jedná se o segment, který řídí a kontroluje kosmický segment. Hlavním úkolem tohoto segmentu je monitoring drah družic, zasílání řídicích signálů, kontrola pohybu družic a údržba atomových hodin. Veškerý pohyb družic je sledován monitorovacími stanicemi, které jsou rozmístěny po celé Zemi v různých lokalitách: Havajské ostrovy, Kwajalein, Ascension, Diego Garcia, Cape Canaveral, Buenos Aires, Osan a další. Hlavní řídicí středisko MCS (*Master Control Station*) je umístěno na Schrieverově letecké základně v Colorado Springs v Coloradu.

Monitorovací stanice přijímají navigační zprávy z družic, které je však pouze zasílají do hlavního řídicího střediska k dalšímu zpracování. V hlavním řídicím středisku pak probíhá úprava družicové efemeridy a provádí se synchronizace atomových hodin s přesností na mikrosekundy. Po provedení všech úprav a korekcí jsou tyto informace odeslány stanicím odkud jsou vysílány navigačním družicím alespoň jednou denně. [30]

2.5.5 Uživatelský segment systému GPS

Tento segment je tvořen samotnými uživateli a jejich přijímači, které obsahují anténu, procesor a velmi stabilní hodiny. Přijímače umožňují uživateli zobrazit údaje o poloze a rychlosti. Komunikace je pasivní, to znamená, že probíhá pouze z družice k uživateli. Provoz přijímačů není nijak zpoplatněn za využívání jejich služeb. Výhodou pasivní komunikace je, že systém může obsloužit neomezený počet uživatelů, protože nemusí komunikovat s družicemi. [30]

2.6 Systém Glonass

2.6.1 Historie Glonass

Glonass je družicový systém, který byl původně vyvinut v Sovětském svazu. Jeho vývoj započal v roce 1970, kdy byl vydán dokument Ministerstva obrany SSSR, který obsahoval úmluvu o vývoji navigačního systému pro použití kdekoli na Zemi. V roce 1982 byly vyneseny na oběžnou dráhu první dvě testovací družice a jedna provozní družice. Do roku 1991 bylo vypuštěno dalších 11 družic, které jsou umístěné ve dvou rovinách. Ostrý provoz systému byl zahájen v prosinci roku 1995. Systém Glonass provázely problémy už od počátku jeho vývoje. Z důvodu špatné ekonomické situace bylo v roce 2002 provozuschopných jenom osm družic a systém díky tomu byl téměř nepoužitelný. [28]

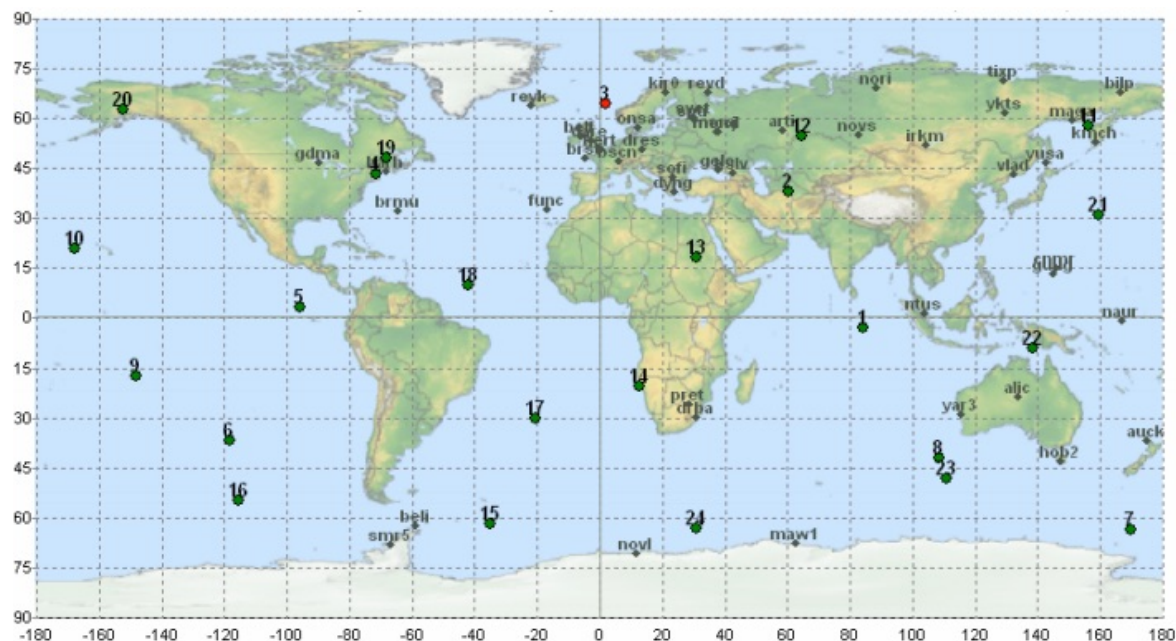
2.6.2 Současnost Glonass

V současné době je v provozu nejstarší družice, která byla vypuštěna už v roce 2000. Vývoj družic stále probíhá a dochází k růstu počtu družic na oběžné dráze pod jménem Uragan-M s životností až 7 let. V roce 2005 byly vypuštěny další dvě družice stejného typu a dále má systém k dispozici ještě další družice s názvem Uragan-K, které jsou lehčí a jejich životnost je 10 až 12 let. Z důvodu vysokých nákladů začalo Rusko úzce spolupracovat s indickou vládou, která pomohla vypustit další dvě družice Uragan-M. Dnes je na oběžné dráze umístěno 24 družic, z nichž je 21 plně v provozu a 3 slouží jako záložní v případě poruchy jedné z družic. [28]

2.6.3 Kosmický segment systému Glonass

Konstelace systému Glonass je charakteristická identickým opakováním rozmístění družic na oběžné dráze Země každých osm dní. Každá rovina obsahuje osm družic, které jsou rovnoměrně rozmístěny po 45° a po jednom hvězdném dni dochází k neidentickému opakování rozmístění družic, což znamená, že každých osm hvězdných dní je družice na stejném místě nad Zemí. Toto je jeden z hlavních rozdílů mezi systémy Glonass a systémem GPS. Segment je složen z 24 navigačních družic z nichž je 21 provozuschopných a 3 družice jsou záložní (v každé orbitální rovině jedna). Aby bylo dosaženo co nejlepšího pokrytí a viditelnosti, tak jsou družice v jednotlivých rovinách posunuty o 15° a 30° , což zajišťuje viditelnost minimálně šesti družic kdekoli na Zemi.

Družice jsou očíslovány pomocí značení SVN (*Space Vehicle Number*). Pomocí tohoto značení jsou identifikovány družice v jednotlivých drahách, ve kterých jsou umístěny. Na první dráze jsou družice SVN 1 až 8, na druhé 9 až 16 a na třetí dráze 17 až 24. Družice Uragan mají velmi zásadním problém a tím je životnost, což vede k častému obnovování družic. Na obrázku č. 2.3 je vidět rozmístění družic systému Glonass v roce 2017. [17]



Obrázek 2.3: Poloha družic systému Glonass v roce 2017. [26]

2.6.4 Řídicí segment systému Glonass

Řídicí segment systému Glonass pracuje velmi podobně jako u systému GPS. Stará se o kontrolu drah družic, zasílá informace družicím pro navigaci a změnu pohybu a synchronizuje čas atomových hodin. Jeho hlavní řídicí středisko SCC je umístěno v Krasnoznamensku u Moskvy. Všechny monitorovací stanice jsou umístěny na území bývalých států SSSR. To přináší nevýhodu monitoringu, který je časově omezen. Systém má 5 povelových stanic značených jako TT&C umístěných v Petrohradě, Ussurijsku a Šelkovo, Jenisejsk, Komsomolsk na Amuru. Tyto stanice zpracovávají signály z družic a odesílají je do hlavního řídicího střediska, kde probíhají korekce drah a hodin a odesílají se zpět vybraným TT&C stanicím, které pak vysílají aktualizovaná data družicím.

Řídicí segment Glonass obsahuje laserové měřicí stanice SLR (*Station for Laser Ringing*), které měří vzdálenost družic pomocí laserových paprsků a umožňují určit polohu družice s velmi vysokou přesností. Segment komunikuje s uživatelským segmentem pomocí zpráv NAGU, které nesou informace o odstávkách družic, jejich provozu a informace o aktuálních poruchách. [17]

2.6.5 Uživatelský segment systému Glonass

Podobně jako u systému GPS, uživatelé využívají přijímače, které přijímají signály z družic. Přijímač po zpracování dat z družice umožní určit polohu přijímače, nadmořskou výšku a zobrazí přesný čas a datum. Komunikace je opět pasivní tzn. komunikace probíhá z družice k uživateli. Uživatelé se dělí do dvou skupin a to na autorizované a neautorizované. Do první kategorie jsou řazeny uživatelé armády Ruské federace a některé vládní instituce, které získávají větší přesnost systému. Zbývající uživatelé využívají standardní polohovací systém.

V dnešní době přijímače Glonass nejsou tak rozšířené jako přijímače GPS, ale existují přijímače, které umožňují přijímat data z obou systémů zároveň. [17]

2.7 Systém Galileo

2.7.1 Historie Galileo

Vývoj systému byl zahájen v roce 1999 a jedná se o evropský projekt, který buduje Evropská komise společně s Evropskou kosmickou agenturou. Tento systém měl nabízet záruku, že služby navigačního systému nebudou přerušeny nebo pozastaveny a dále pak plnou účast Evropy na budoucím vývoji.

Systém se potýkal s celou řadou politických a ekonomických problémů. První testovací družice byla vypuštěna v roce 2005 a byla v provozu do ledna roku 2006. V roce 2011 byl vypuštěn první satelit systému Galileo. Důvod vývoje tohoto systému byl takový, že systémy GPS a Glonass jsou primárně zaměřeny na vojenské složky USA a Ruska, a kvůli tomu může v nouzových situacích dojít k jejich nedostupnosti, a proto je systém Galileo navržen tak, aby jeho řízení a správa byla pod civilní správou. [24]

2.7.2 Současnost Galileo

Dnes má systém k dispozici 10 družic a počítá se, že plného operačního provozu dosáhne v roce 2019. Jednou ze zajímavostí je, že jako hlavní sídlo tohoto evropského systému bylo vybráno v pražských Holešovicích. Evropský systém je primárně navržen pro civilní použití a to hlavně v dopravě (letecká, silniční, železniční, atd.), ale měl by být použit i pro bezpečnost a větší přesnost.

Galileo se vyznačuje velmi vysokou přesností zaměření přístroje a dokáže tak zajistit aktuální polohu s přesností na jeden metr. Evropský systém bude nabízet celkem čtyři druhy služeb – základní služba (*Open Service*), komerční služba (*Commercial Service*), veřejně regulovaná služba (*Public Regulated Service*), vyhledávací a záchranná služba (*Search And Rescue Service*).

Systém se příliš neliší od GPS a Glonass, jelikož poskytuje stejné navigační a lokalizační systémy a zároveň je s nimi i kompatibilní. Díky využití všech třech systémů je možné určit polohu přijímače s přesností na jednotky centimetrů.

Během roku 2018 by se systém Galileo měl rozšířit do evropských automobilů, které budou poskytovat přesnější určování polohy. Systém Galileo bude využíván v projektu eCall, který je zaměřený na pomoc účastníkům silničního provozu, kteří potřebují rychlou pomoc při dopravních nehodách a navigační systém bude poskytovat dostatečně přesnou polohu pro lokalizování nehody. [24]

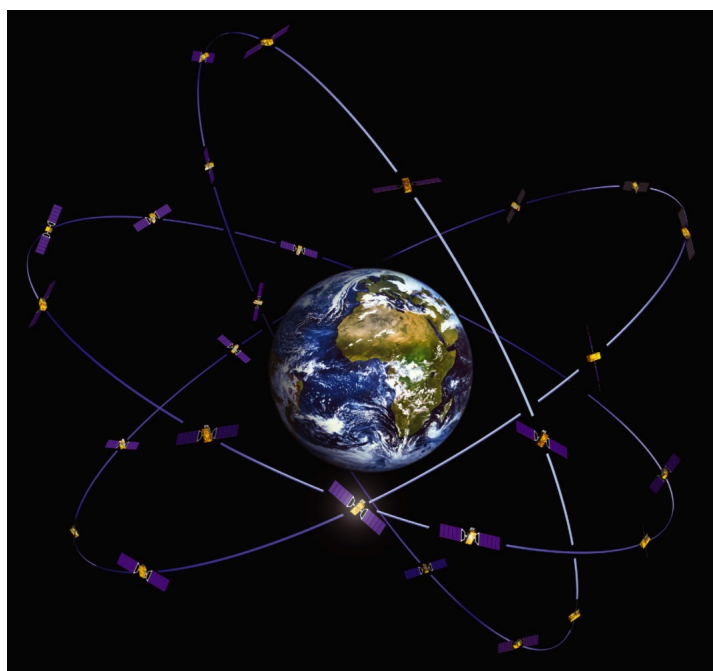
2.7.3 Kosmický segment systému Galileo

Plnohodnotný systém bude v budoucnu obsahovat až 30 družic přičemž 27 bude aktivních a 3 družice budou sloužit jako záložní. Družice budou obíhat ve třech rovinách ve výšce 23 222 km nad Zemí s inklinací 56°, které budou posunuty o 120°. Družice budou schopné pokrýt signálem i polární oblasti nad 75° zeměpisné šířky. Každá rovina bude obsahovat devět aktivních družic a budou doplněny jednou záložní, pokud

dojde k výpadku nebo poruše zbylých devíti. Družice každých deset dní zopakují svojí konstelaci a během těchto deseti dní 17x oběhnou Zemi.

Družice nesou dva typy velmi přesných stabilních hodin - vodíkové hodiny a atomové hodiny. Odchylka hodin je po 12 hodinách přibližně 0,45 ns. Satelity Galileo nesou 4 hodiny, dvojce každého typu a jsou konfigurovány tak, že vodíkové hodiny jsou v primárním módu a atomové hodiny slouží jako záložní hodiny v případě poruchy a musejí být aktivovány segmentem.

Další významnou částí družic je jednotka CMCU (*Clock Monitoring and Control Unit*), která zajišťuje komunikaci mezi hodinami a jednotkou pro generování navigačního signálu NSU (*Navigation Signal generator Unit*). CMCU přenáší signál z hlavních hodin do NSU a zajišťuje, aby byly ve fázi frekvence hlavních a záložních hodin v případě výpadku nebo poruchy některých hodin. Poloha družic systému Galileo je znázorněna na obrázku č. 2.4. [21]



Obrázek 2.4: Poloha družic systému Galileo v roce 2017. [7]

2.7.4 Řídicí segment systému Galileo

Řídicí segment systému Galileo má stejný úkol jako předchozí dva systémy. Stará se o řízení, kontrolu pohybu družic, synchronizaci hodin a vysílání informačních signálů. Segment tvoří dvě řídicí střediska a řadu pozemních monitorovacích stanic. Celý segment lze rozdělit na 3 části: globální, regionální a lokální.

Globální část segmentu obsahuje dvě řídicí centra. První centrum GSC (*Ground Control System*), které je umístěné v německém Oberpfaffenhofenu, má za úkol přijímat informace ze senzorových stanic a telemetrických TT&C stanic (*Telemetry, Tracking and Command Station*). Z dat, které řídicí stanice získá, se vyhodnotí stav všech družic a provede se korekce drah a synchronizace hodin pomocí řídicích signálů, které jsou předány stanicím TT&C a z nich jsou vyslány povely zpět družicím.

Druhé řídicí centrum GMS (*Ground Mission Segment*) se nachází v italském Fucinu. GMS má za úkol kontrolovat navigační funkce celého navigačního systému a sestavuje navigační zprávy, které pak předává vysílacím stanicím ULS (*UpLink Station*). GMS bude dále přijímat data ze senzorových stanic a bude z nich vytvářet korekce hodin a parametry drah družic.

Na konci vývoje systému by měla obě řídicí centra být plně synchronizována tak, aby jedno centrum bylo schopné převzít funkci toho druhého v případě poruchy jednoho centra.

Regionální část je tvořena několika stanicemi ERIS (*External Region Integrity Systems*), které jsou spravovány soukromými společnostmi, popřípadě státy a skupinami států mimo EU. Jejich hlavním úkolem je zajišťovat informování o integritě systému nezávisle na hlášení systému Galileo.

Poslední částí je lokální část, která slouží ke zlepšení příjmu signálu systému Galileo v lokálních oblastech. Těmito místy jsou myšleny např. oblasti, kde je příjem signálu z družic problematický (okolí letišť, dálnic, nádraží, atd.). Stejně jako regionální složky by i lokální složky měly být spravovány soukromými společnostmi. [21]

2.7.5 Uživatelský segment systému Galileo

Uživatelský segment systému Galileo není tak rozšířený jako u GPS a Glonass. Uživatelé budou používat různé druhy přijímačů, které budou využívány pro různé účely. Vývoj přijímačů bude zaměřený na přijímače pro kombinaci systémů Galileo/GPS nebo Galileo/GPS/Glonass.

V uživatelském segmentu najde uplatnění při využívání bankovních transakcí, v telekomunikaci a energetice díky velmi přesné časové synchronizaci, která je pro tyto účely podstatná. [21]

2.7.6 Služby systému Galileo

Systém Galileo se už od počátku liší od systému GPS a Glonass poskytováním širší nabídkou služeb. Systém by měl nabídnout 5 druhů služeb: [6]

- **Základní služba** (*OS - Open Service*) - základní služba, která by měla být volně dostupná. Služba bude pracovat na signálech vysílaných na třech pásmech L1, E5a a E5b, které lze mezi sebou kombinovat. Pomocí frekvenčního pásma L1 a E5a nebo L1 a E5b, lze eliminovat ionosférickou chybu a je možné zajistit větší přesnost, než kdyby byla použita pouze frekvence L1. Použitím této kombinace je přesnost v metrech, při použití kombinace všech tří frekvencí je přesnost až v jednotkách centimetrů.
- **Komerční služba** (*CS - Commercial Service*) - od základní služby se liší v použití dalších dvou frekvencí. Tyto frekvence budou šifrovány a zpoplatněny. Komerční služba nabídne větší přesnost a bude poskytovat informace o aktuální dopravní situaci, předpověď počasí a jiné.
- **Regulovaná veřejná služba** (*PRS - Public Regulated Service*) - služba PRS je podobná službě PPS ze systému GPS.

Služba je primárně určena pro bezpečnostní složky a armádu a bude používat dva šifrované signály, které budou přístupné pro určené uživatele.

- **Vyhledávací a záchranná služba (SAR - Search and Rescue)** - Jedná se o tísňovou službu nouzové lokalizace pro záchranné služby COSPAS/SARSAT. Služba bude umožňovat oboustrannou komunikaci na frekvencích v pásmu L6.
- **Služba se zajištěnou bezpečností SoL (Safety of Life)** - Služba SoL bude doplňovat OS o data o integritě, která budou přenášena ve zprávách signálů OS. Měla by být využita při kritických dopravních situacích. Tato služba by měla být použita pro automatické přistávání letadel na letištích.

2.8 Systém Beidou/Compass

2.8.1 Historie Beidou/Compass

Podobně jako u systému Galileo, byl vývoj zahájen na počátku 20. století a to konkrétně 30. října 2000, kdy byla na oběžnou dráhu vyslána první družice Beidou 1A a za ní následovala družice Beidou 1B a Beidou 2A. Čína začala úzce spolupracovat na systému Galileo za příslibu finančních investic. Roku 2008 bylo oznámeno, že systém bude umožňovat určení polohy s přesností na 10 metrů v rámci „základní služby“. První generace systému Beidou byla omezena pouze na území Číny a jednalo se o aktivní službu, kde byl omezen počet uživatelů s tím, že si uživatel musel požádat o určení polohy. [39]

2.8.2 Současnost Beidou/Compass

Systém Beidou nyní používá geostacionární družice, tzn. nepotřebuje tolik družic jako ostatní navigační systémy, které jsou umístěny na střední oběžné dráze vzhledem k zemskému povrchu. Z tohoto důvodu systém Beidou pokrývá pouze tu oblast, nad kterou jsou družice umístěny a počítá se, že by měl být systém dostupný pro celou Zemi po roce 2020. Druhá generace systému Beidou-2, která je také známá jako Compass, by neměla být rozšířením původního systému, ale měla by ho nahradit. Tento nový systém bude obsahovat až 35 družic, kde bude vyhrazeno 5 družic pro zpětnou kompatibilitu s Beidou první generace.

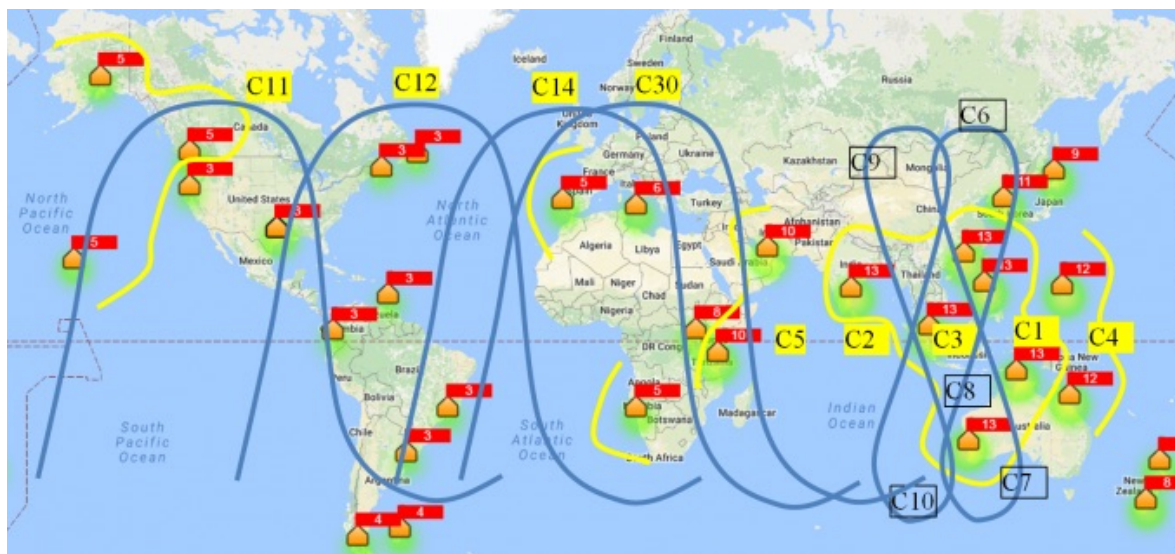
Nový systém Compass bude poskytovat dva typy služeb - bezplatnou službu pro běžné uživatele a koncesovanou službu pro armádu. Bezplatná služba nebude tak přesná jako koncesovaná služba a bude schopná určit polohu s přesností na 10 metrů a družicové hodiny budou synchronizovány s přesností 50 ns. Přesnost měření rychlosti by měla být přibližně 0.2 m/s. Koncesovaná služba bude přesnější, využívána pro komunikaci a poskytování informací o stavu systému.

Čína v současnosti pokračuje na experimentálních a přípravných pracích na systému Beidou 2 neboli Compass. [39]

2.8.3 Kosmický segment systému Beidou/Compass

Kosmický segment obsahoval tři geostacionární družice, které zajišťovaly platný operační stav celého systému. Přesnost těchto družic byla 100 m a méně než 20 m při použití diferenční metody na souřadnicích 70° až 140° východní délky a 5° až 55° severní šířky.

Nástupce systému Beidou Compass bude tvořen 35 družicemi a 5 z nich bude na geostacionárních drahách. 27 družic bude umístěno na střední dráze MEO ve 3 orbitálních rovinách s inklinací 56° a výškou 21 363 km. Ve výšce 36 000 km budou operovat 3 družice na geosynchronní dráze s inklinací 50°. [24]



Obrázek 2.5: Poloha družic systému Beidou v roce 2016. [34]

Kapitola 3

Drony

3.1 Vývoj

Kvadrokoptéra je známá nejčastěji pod názvem jako dron nebo z angličtiny jako *drone*. První zařízení byla vyvinuta už v roce 1920 Etiennem Oehmichenem, a už tehdy se stroj podobal dnešním dronům. Původně měly sloužit pro přepravu lidské posádky, což se moc neprosadilo, a proto se dnes nejčastěji setkáváme s malými bezpilotními letouny, které jsou rádiově řízené, a oblast jejich využití je velmi široká (stavební firmy je používají pro kontroly budov, v energetice pomocí dronů a speciálních kamer měří elektrické vedení, atd.), čím dál častěji jsou nasazovány i záchrannými složkami, u policie nebo u armády, kde mohou být využity pro prohledávání trosek budov po různých katastrofách. Můžeme se setkat s drony s různými typy ovládání.

Vývoj mobilní robotiky se v současné době přesouvá od humanoidních robotů, kteří by měli provádět běžné lidské úkony, k létajícím bezpilotním dronům. Vývoj těchto zařízení je dnes ve svých počátcích a v praxi to znamená, že drony určené pro armádu jsou stále řízeny lidskou obsluhou a drony, které se využívají v průmyslu, jsou navigovány pomocí externích signálů - v budovách pomocí gyroskopů a popř. kamer, venku pomocí navigačních systémů. S tím dochází k problémům s přesnou lokalizací stroje. [38]

3.2 Základní komponenty dronů

V této části budou popsány důležité komponenty, které jsou potřebné ke správné funkci dronu. Dron je ve většině případů složen z nosného rámu, na kterém jsou umístěny všechny komponenty. Obvykle je na středu umístěn akumulátor s řídicí jednotkou. Mohou nést celou řadu různých senzorů a kamer na svém podvozku, které jsou potřebné pro plnění účelu, pro který byl dron vytvořen. Nejdůležitější částí stroje, která je od něj oddělena je ovládací zařízení, které umožňuje ovládání rychlosti, výšky, směru letu a ovládání přídatného příslušenství jako jsou kamery.

3.2.1 Rám

Jedná se o pasivní část, která nese všechny komponenty potřebné pro let. Nejčastěji se skládá ze dvou párů ramen a dvou desek, které jsou vyráběny z různých materiálů (uhlík, hliník, dural a další). Zvolení správného typu materiálu je závislé na

době letu, kde rozhoduje hmotnost materiálu. Všechny komponenty, kterými jsou řídicí jednotka, motory, vrtule, regulátory, senzory a akumulátor, jsou pevně uchyceny k rámu.



Obrázek 3.1: Rám kvadrokoptéry DJI F450. [2]

3.2.2 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je mozkiem celého stroje, kde probíhají veškeré výpočty. Velmi důležitou částí je samotný firmware, který zpracovává data ze senzorů a aplikuje na ně algoritmy pro stabilizaci. Jednotka obsahuje senzory jako akcelerometr, který slouží pro měření zrychlení, gyroskop, který řídí rychlost otáčení ve třech osách, magnetometr upřesňuje měření ostatních senzorů na základě měření magnetického pole v závislosti magnetického pole Země. Navigační senzor GPS slouží pro přesnou lokalizaci a stabilizaci stroje. GPS senzor rozšiřuje základní funkce a to tak, že můžeme uložit startovní souřadnice, na které se dron může sám vrátit po ztrátě signálu a přistát. Řídicí jednotka musí komunikovat s regulátory motorů, kterým posílá signály s hodnotami napětí pro regulaci otáček motorů.

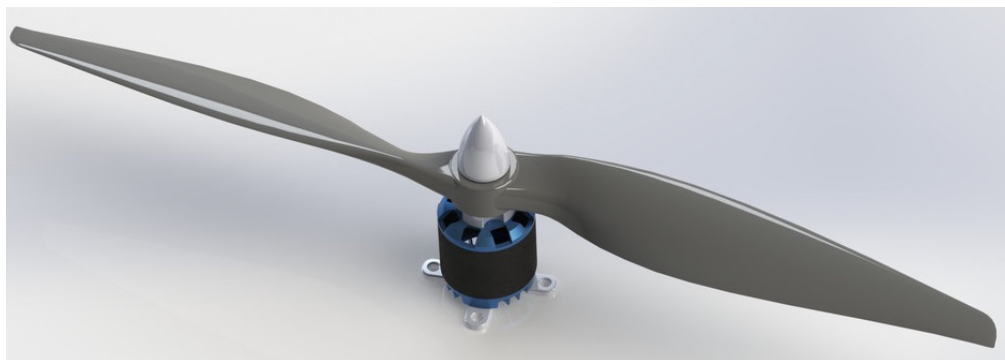


Obrázek 3.2: Řídicí jednotka pro DJI Phantom 4. [3]

3.2.3 Rotory a vrtule

Je možné používat dva druhy motorů - stejnosměrné, které jsou jednoduché na řízení, ale složitější na údržbu a konstrukční zpracování a můžeme se s nimi setkat především u levných typů dronů, a střídavé motory, které jsou jednodušší na údržbu a mají větší životnost. Při otáčení motoru se rotor a stator nedostávají do kontaktu a nedochází k takovému opotřebení. Nevýhodou střídavých motorů jsou regulátory ESC (*Electronic Speed Controllers*), které napájí motory elektrickým proudem pomocí tří vodičů. Mezi důležité parametry při výběru motorů patří počet otáček za minutu RPM a napětí udávané v kV.

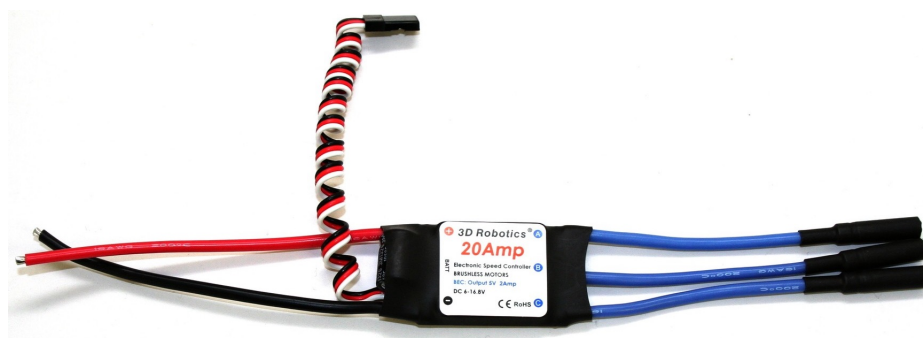
Drony využívají pro svůj pohyb dva páry pevných vrtulí: dvě se otáčejí po směru hodinových ručiček (CW) a dvě v protisměru (CCW), díky tomu mají jednodušší mechanickou konstrukci oproti klasickým vrtulníkům. Aby byl zajištěn správný pohyb a směr dronu, musí se motory točit nezávisle na sobě a změnou rychlosti jednotlivých motorů zajistíme potřebný směr, točivý moment nebo sílu otáčení. Vrtule jsou konstruované tak, aby na horní straně vrtule vznikala podtlak a na spodní straně tlak.



Obrázek 3.3: Střídavý motor s vrtulí. [13]

3.2.4 Regulátory motorů

Regulátory motorů ESC (*Electronic Speed Controllers*) přijímají signály z řídicí jednotky a na základě jejich vyhodnocení regulují rychlost otáčení střídavých motorů. Regulátory se liší hlavně ve velikosti proudu, který mohou dodávat motorům. Regulátory pomocí FET tranzistorů přeměňují stejnosměrné napětí na třífázový střídavý signál. Hodnoty proudu se pohybují od 10 A až po 40 A v závislosti na typu motoru. Všechny tyto regulátory jsou vybaveny kondenzátorem, který vyrovnává poklesy napětí a tím předchází špatné komunikaci motoru s řídicí jednotkou.



Obrázek 3.4: Střídavý regulátor ESC 20 A. [4]

3.2.5 Akumulátor

Další důležitou komponentou je akumulátor, který je zdrojem energie celého stroje. Nejčastěji se u dronů používají Li-Pol akumulátory, které obsahují několik článků a tím ovlivňují velikost napětí a výdrž akumulátoru. U akumulátorů lze kombinovat jejich zapojení buď sériově (větší napětí), paralelně (větší kapacita) nebo sériovoparalelně. Jeden článek může mít maximální napětí 4,2 V, nominální napětí 3,7 V a minimální napětí 2,9 V.

Obvykle se jedná o nejtěžší komponentu, jelikož s narůstající kapacitou roste i velikost akumulátoru a kvůli tomu je ovlivněna doba letu, která se pohybuje od 3 minut do 40 minut. Dobu letu ovlivňují i další části jako je příslušenství, typ vrtulí, povětrnostní podmínky a údržba akumulátoru.



Obrázek 3.5: Akumulátor G3 RAY Li-Pol 3000 mAh. [5]

3.3 Senzory pro snímání polohy

3.3.1 Magnetometr

Magnetometr slouží pro snímání magnetického pole Země a jsou z něho čtena data, ze kterých lze určit polohu senzoru. Je to elektronický přístroj pro měření magnetické indukce a jejího směru nebo magnetického momentu. Princip magnetometrů lze použít jen na nízkých orbitách z důvodu snižující se intenzity magnetického pole Země a zvětšující se vzdálenosti od ní. Nemůže být tedy použit pro geostacionární družice a v konečném důsledku není moc vhodný při použití pro přesné určování polohy. [19]

3.3.2 Gyroskop

Gyroskop je zařízení, které slouží pro navigaci, a k určení polohy využívá rotující setrvačnick, který zachovává polohu osy své rotace. Setrvačnick si uchovává původní osu rotace díky vysokému momentu hybnosti rotujícího setrvačnicku bez ohledu na otáčení závěsů. Přesnost lze zajistit udržením otáček gyroskopu. Nevýhodou gyroskopů je, že dochází ke tření v závěsech, a vzniká tak chyba, která ovlivňuje orientaci osy rotující části gyroskopu. Další nevýhoda při použití gyroskopu spočívá v tom, že ho nelze použít pro určení pozice, ale jen pro určení orientace v prostoru, a proto je nutné kombinovat gyroskop s dalšími polohovými senzory. [25]

3.3.3 Akcelerometr

Jedná se o pohybový senzor, který se používá pro měření statického nebo dynamického zrychlení a jsou vhodné nejen pro měření odstředivých nebo setrvačných sil, ale také pro určení pozice tělesa. V dnešní době se velmi často používá pro mobilní zařízení, kde slouží pro orientaci displeje telefonu. Akcelerometry jsou vhodné pro měření seismické aktivity nebo pro měření vibrací. Stejně jako u gyroskopů je nutné provádět pravidelné korekce údajů pro přesné měření. [33]

3.3.4 Senzory pro navigační systémy

Pro tento projekt byly vybrány senzory, které jsou určeny pro navigační systémy a kombinují v sobě technologie až pěti nejznámějších navigačních systémů – GPS, Glonass, Galileo, Beidou a QZSS.

Tyto nejznámější navigační systémy můžeme najít pod zkratkou GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*. Princip výpočtu přijatých rádiových signálů je použit nejen pro určování polohy na Zemi, ale i v blízkém vesmíru nebo na oběžné dráze na nízké orbitě. Pro příjem signálů z družic lze používat malé levné senzory, které mohou pracovat s velmi velkou přesností. V dnešní době se jedná o jedno z nejpřesnějších určování polohy rádiové navigaci společně s měřením magnetického pole Země. Nevýhodou takovýchto senzorů bývá potřeba přímé viditelnosti oblohy, např. do budov se rádiový signál téměř nedostane.

3.4 Použití navigačních systémů u dronů

Navigační systémy u dronů úzce souvisí s různými formami autonomie, u které je zapotřebí systém GPS popř. další navigační systémy. V tomto případě můžeme rozdělit použití dronů z pohledu autonomie na tři kategorie - drony se stálou kontrolou, částečnou kontrolou nebo řízení bez kontroly a interakce pilota (autonomní). [16]

Nejlevnější drony, které jsou určeny pro komerční létání, obvykle GPS nemají a stroj je plně ovládán pilotem. Pokročilé drony už nesou GPS moduly, které umožňují řadu inteligentních letových módů:

- **Držení pozice** (*Position Hold*) - pomocí systému GPS dokáže dron udržet svoji pozici a pevnou výšku. Při držení pozice vznikají odchylky a stroj může svoji pozici měnit v závislosti na optimalizaci algoritmu pro udržení pozice a kvalitě popř. přesnosti GPS modulu.
- **Návrat domů** (*Return to home*) - tato funkce je používána převážně při ztrátě signálu ovládacího zařízení nebo při nedostatku energie akumulátoru, aby nedošlo ke ztrátě stroje popř. dalším škodám. Na začátku letu jsou zaznamenány GPS souřadnice, aby se mohl stroj vrátit na původní pozici. Po stisknutí příslušného tlačítka se stroj začne sám vracet na vzletovou pozici.
- **Autonomní let** (*Autonomous flight*) - pro autonomní let se využívají tzv. *waypoints*, které jsou tvořeny GPS souřadnicemi na mapě. Stroj je pak schopný letět v určité výšce podle zadaných souřadnic na mapě úplně sám a pokud má potřebné senzory, je schopný detekovat kolize a zabránit tak střetům s překážkami.

Aby bylo možné tyto funkce využívat, musí dron obsahovat GPS modul, který bude zpracovávat signály z družic. Družice poskytují stroji informace o pozici, rychlosti a času pohybu. Tento typ navigace je nejpřesnější ze všech navigačních technologií a umožňuje přesnost stroje na jednotky metrů. Rozšířené funkce GPS popř. kombinace navigačních systémů poskytují informace o poloze s přesností na několik centimetrů. Díky systému GPS je možné používat navigaci dronu kdekoli na Zemi.

3.4.1 Waypoints

Řízení dronu pomocí GPS *waypoints* je rozšířenou technologií, která umožňuje do jisté míry plně autonomní létání. Tato funkce říká dronu jak vysoko, rychle a kudy má letět.

Tato funkce je čím dál častěji využívána v zemědělství, kde jsou drony používány pro hledání ztracené zvěře nebo pro mapování terénu polí. Můžeme se setkat i se stroji, které jsou speciálně upravené pro údržbu částí polí a umožňují farmářům lepší analýzu pozemků.

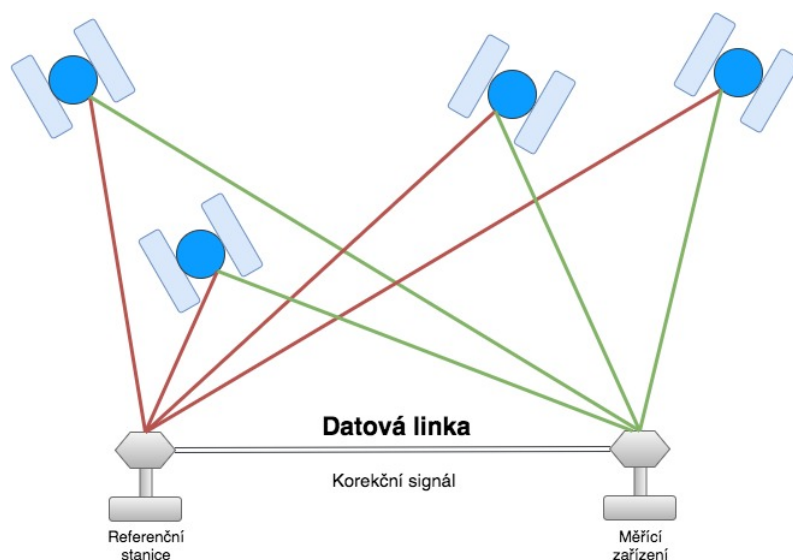
Dále se s touto funkcí můžeme setkat u přepravních společností, které začínají drony nasazovat na doručování zásilek. Před odesláním zásilky jsou určeny body *waypoints* na mapě a dron je schopný sám doletět na místo určení a zpět bez zásahu pilota. Nevýhodou tohoto použití je krátká doba doletu, která může být maximálně 15 až 20 minut. Jako první tento způsob doručování využila firma Amazon.

Své využití funkce našla ve filmovém průmyslu a ve stavebnictví, kde piloti zadají určité body na mapě a poté se soustředí pouze na video záběry nebo na pořizování fotografií. [16]

3.4.2 Diferenční systémy

Diferenční GPS ve zkratce DGPS je systém, kterým je možné zpřesňovat výsledky měření u systému GPS.

Princip systému je takový, že umístíme GPS přijímač (referenční stanici) na místo o známých souřadnicích a poté pozorujeme a porovnáváme referenční a měřenou polohu. Pomocí porovnávání polohy získáme korekce měřených zdánlivých vzdáleností. Korekce jsou pak uživatelům poskytovány pomocí internetu nebo přes mobilní síť do přijímače. Data lze přenášet i vhodným navigačním kanálem nebo může být využito tzv. off-line zpracování.



Obrázek 3.6: Princip funkce systému DGPS.

Pro celý systém je tedy nutná referenční stanice, která obsahuje přesný GNSS přijímač a komunikační zařízení, které rozesílá naměřené korekce. Pomocí korekcí může uživatel zpřesnit svoje údaje o poloze. Nevýhodou tohoto systému je omezení na dané okolí referenční stanice. Je tedy nutné určit maximální dobu získávání korekcí, která je přibližně 15 sekund v opačném případě se tento systém stává neúčinný. Korekce účinně zpřesňují polohu do vzdálenosti asi 400 km od referenční stanice. Chybovost systému DGPS eliminuje diferenční měření, jemuž předchází zdroje se stejnými jevy pro referenční stanici i GNSS přijímač. Navigační signál od družice k referenční stanici má podobné ionosferické zpoždění z důvodu šíření signálu po stejné trase.

Korekčních dat existuje přibližně 63 typů, ale ne všechny jsou využívány. Korekční data jsou odesílána formou zpráv, které obsahují informace z DGPS a identifikaci referenční stanice. Data jsou vysílána v datových rámcích a obsahují identifikaci stanice, typ zprávy a sekvenci korekčních dat. Využívá se tzv. *postprocessing* (dodatečné zpracování), které je použito v případě, že není potřeba pracovat s měřenými souřadnicemi ihned a stačí, když se budou korekce zaznamenávat na referenční stanici k dalšímu zpracování.

DGPS je především využívána ve stavebnictví a geodézii nebo v zemědělství a popř. tam kde je tolerance nepřesnosti měření polohy v rozmezí jeden až pět metrů. [41]

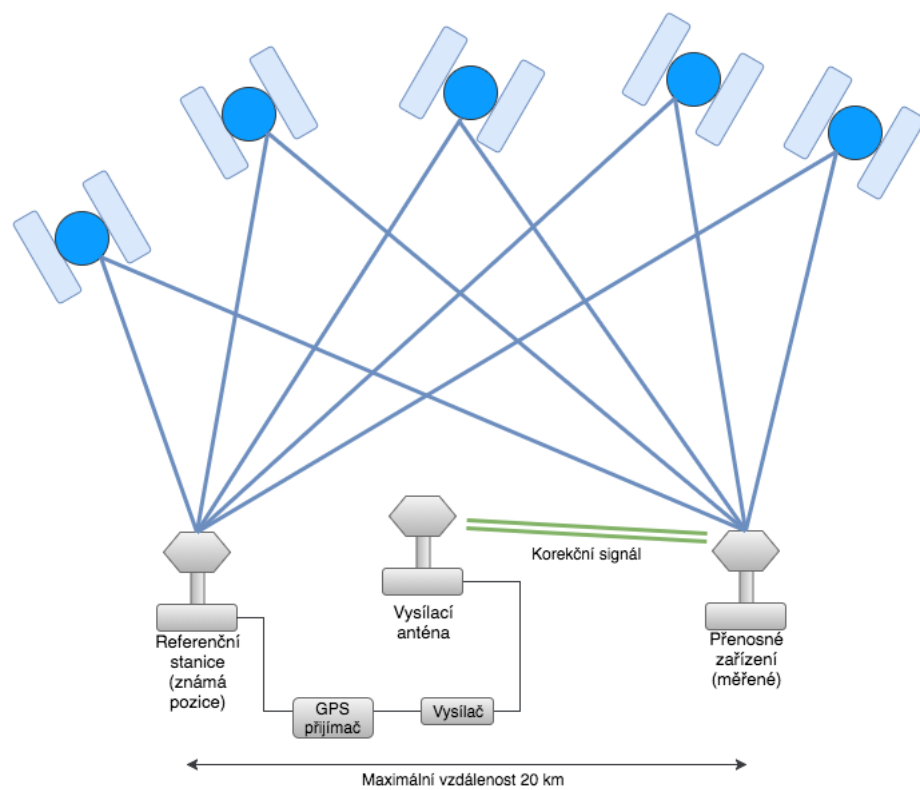
3.4.3 RTK (Real Time Kinematic)

Tato technologie používá kombinaci globálních navigačních systémů jako jsou GPS, Glonass, Beidou a Galileo pro zvýšení přesnosti pozice zařízení. Je založena na měření fázových nosných vln, které poskytuje referenční stanice a jsou řádově přesnější než kódové nosné vlny. Referenční stanice poskytuje korekce, které slouží pro určení přesnosti na jednotky centimetrů. Rozsah mezi referenční stanicí a pohybujícím se zařízením se vypočítá pomocí stanovení počtu nosných cyklů mezi družicemi a referenční stanicí a vynásobí se nosnou vlnovou délkou.

Pro fungování tohoto systému je zapotřebí dvou přijímačů GNSS s podporou RTK, kde jeden přijímač je umístěn staticky a určuje svou pevnou pozici. Přijímač (tzv. *base station*) počítá odchylky svých souřadnic a naměřených souřadnic. Druhé zařízení (tzv. *rover*) se pohybuje a počítá svoji pozici pomocí korekčních dat, které přijímá z báze stanice. Přesnost lze získat dvěma způsoby, pokud umístíme bázeový přijímač na známou pozici, získáme velmi přesná absolutní data. Pokud ale pozici neznáme, získáme pouze relativní data.

Technologii RTK začala používat firma DJI pro zajištění větší přesnosti svých dronů. V případě DJI se jedná o technologii D-RTK, která zajišťuje pozici letounu pomocí specializovaného softwaru integrovaného v přijímači a pomocí algoritmů, které kombinují navigační systémy GPS + Beidou nebo GPS + Glonass.

Používá se především pro analýzy terénu, hydrografické průzkumy a pro zpřesnění navigace bezpilotních letounů. [15]



Obrázek 3.7: Ilustrace fungování RTK.

Kapitola 4

Použité součásti pro realizaci

4.1 Arduino

Arduino se stalo velmi populárním mikrokontrolérem, který je založen na open-source platformě a využívá čipu ATmega od firmy Atmel. Populárním se stal hlavně proto, že se jedná o jednoduchou platformu, která se dá využít pro výuku studentů, kteří se díky tomu mohou seznámit s různými zařízeními. Vývojové prostředí pro Arduino je založeno na prostředí *Wiring a Processing*. Tyto projekty se snaží co nejvíce zjednodušit programování pro širokou veřejnost. Vývojové desky Arduino se stále častěji používají pro tvorbu a implementaci domácích bezpilotních letounů.

Program, který je nahráván a spouštěn na vývojových deskách se vyvíjí zvlášť na stolním počítači. Tento řídicí program je rozdělen do dvou částí – první blok slouží pro nastavení proměnných, vstupů/výstupů a dalších, druhý blok obsahuje smyčku, která běží stále dokola po celou dobu běhu programu (dochází k neustálé kontrole okolí a reagování na změny). Arduino má velmi malou spotřebu a je tedy vhodné pro stavbu robotů, dronů a podobných zařízení.

V dnešní době se objevují platformy podobné Arduino a to např. Raspberry Pi, zde se ale už jedná o plnohodnotný stolní počítač. [22]

4.1.1 Hardware Arduino

Hardware použitý pro mikrokontroléry Arduino obsahuje 8bitové mikrokontroléry od firmy Atmel a celou řadu komplexních obvodů. Dnes se můžeme setkat s řadou vývojových desek např. ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280, ATmega2560 a nově také ARM. Jednotlivé desky jsou vybaveny tzv. *Shield* paticemi, které umožňují připojení dalších obvodů. Dále jsou zde obvody pro řízení sériové komunikace, které zajišťují komunikaci s počítači s emulací virtuálních COM portů přes USB. I když Arduino komunikuje pomocí rozhraní USB, je potřeba softwarově simulovat sériovou komunikaci pomocí linky RS-232. Vývojové desky mimo jiné obsahují obvody s různým počtem I/O digitálních portů, analogové-digitální převodníky, PWM výstupy a porty pro komunikaci. Desky lze dále rozšířit o další periférie jako jsou např. bluetooth, displeje, ultrazvukové senzory, gyroskopy, displeje a spousta dalších. Dnes se Arduino začíná používat i k systémům IoT (*Internet of Things*), které se stávají stále populárnější. Vývojové prostředí má k dispozici celou řadu ovládacích knihoven, díky kterým můžeme ovládat periferní zařízení.

Postupem času se začaly objevovat i různé klony Arduina (FreeDuino, LABduino, Funduino a další). Díky otevřenosti celé platformy není problém si celou vývojovou desku vytvořit samostatně doma. [22]

4.1.2 Vývojové prostředí Arduino

Vývojové prostředí pro Arduino desky neboli Arduino IDE (*Integrated Development Enviroment*) je vyvíjené v jazyce Java a vycházejí pro něj pravidelné aktualizace knihoven nebo podpora nových typů desek. Arduino IDE vychází z výukového prostředí Processing a Wiring. Poslední verzi k datu 10.2. 2018 je verze 1.8.5. Je podporovaná pro různé typy operačních systémů a to pro Windows, Mac OS a Linux v open-source podobě.

Programy pro vývojové desky Arduino jsou psány v jazyce, který vychází z jazyků C a C++ a nese prvky Javy. Program je však trochu rozdílný a to tím, že se dělí na dva základní bloky kódu, které zajišťují nastavení a cyklení programu:

- **setup()** - Funkce, která se volá hned po spuštění programu a je volána vždy jen jednou pro inicializaci proměnných a sběrnic, nastavení režimu pinů (jestli pin bude vstupní nebo výstupní), popř. volání nastavení z knihoven.
- **loop()** - Po nastavení důležitých proměnných a sběrnic ve funkci setup() se začne provádět funkce loop(), která plní funkci tzv. smyčky. Provádí se dokola do té doby, dokud není ukončena nebo přerušena. Používá se pro hlavní řízení desek Arduino.

Nevýhodou Arduino IDE je samotný překlad programu, který je někdy velice zdoluhavý a časově náročný. Další nevýhodou je absence klasického debug módu, takže nemůžeme využít krokování programu a musíme si vystačit pouze s pomocnými výpisy proměnných např. pomocí *Serial.println()*.

4.2 Arduino Due

Pro tuto práci byla zvolena vývojová deska Arduino Due, která je založena na čipu Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Bylo nutné zvolit tento typ vývojové desky z důvodu většího počtu sériových portů než u ostatních desek a z důvodu vyšší uživatelské paměti. Arduino Due je první vývojová deska z řady Arduino, která je založena na 32bitovém ARM procesoru. Deska obsahuje 54 digitálních I/O portů, 12 analogových vstupů a 2 analogové výstupy, krystalový oscilátor, který pracuje na frekvenci 84 MHz, pro komunikaci je použito rozhraní USB, napájecí konektor pro připojení AC/DC adaptéru. Dále je zde konektor pro programování ICSP, SPI piny, JTAG piny a tlačítko reset. Vývojová deska může být napájena napětím 7-12 V nebo z USB. Kontrolér pracuje na napětí 3,3 V. Arduino Due disponuje flash pamětí o velikosti 512 kB pro kód, kde je celý paměťový prostor vyhrazen pro uživatelské aplikace. Mikrokontrolér dále obsahuje 96 kB SRAM (rozdělena do dvou bloků po 64 kB a 32 kB). Digitálními vstupně-výstupními porty může protékat proud o velikosti 120 mA a jsou vybaveny interními pull-up rezistory, které jsou ve výchozím stavu odpojeny.

Aby se zabránilo poškození počítače, je vývojová deska vybavena proudovou pojistkou, která odpojí desku od počítače při překročení maximálního proudu o velikosti 500 mA. [22]. Souhrn parametrů viz tab. 4.1. [11]

Mikročip	AT91SAM3X8E
Pracovní napětí	3,3 V
Doporučené vstupní napětí	7-12 V
Limitní vstupní napětí	6-16 V
Počet digitálních I/O pinů	54 (12 lze použít na PWM)
Analogové vstupní piny	12
Analogové výstupní piny	2 (2x DA převodník)
Max. SS proud na jeden 3,3 V pin	800 mA
Max. SS proud na jeden 5 V pin	800 mA
Flash paměť	512 kB
SRAM	96 kB
Pracovní frekvence	84 MHz
Délka	101,52 mm
Šířka	53,3 mm
Váha	36 g

Tabulka 4.1: Parametry Arduino Due. [11]

4.3 GPS moduly

Oba testované moduly jsou popsány v následující kapitole č. 5, kde je znázorněno jejich měření a porovnání.

4.4 Arduino gyroskop a akcelerometr

4.4.1 IMU

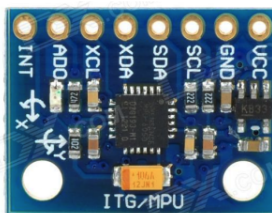
IMU (*Inertial Measurement Unit*) je inerciální řídicí jednotka, kde jejím základem je gyroskop pro měření úhlové rychlosti, pomocí níž se určuje orientace v prostoru, a akcelerometr, který dokáže zjistit rychlost a polohu objektu. Obvykle jsou senzory umístěny do trojrozměrného souřadnicového systému tak, aby osy navigovaného zařízení odpovídaly osám citlivosti akcelerometru a gyroskopu. Jednotka umožňuje měřit translační pohyb a rotační pohyb ve třech ortogonálních osách. Využívá se především pro autonomní navigaci zařízení. Vhodné je použití kombinace GPS a IMU jednotky pro drony. V případě výpadku signálu GPS, dokáže dron udržet svoji pozici, dokud není znovu obnoven signál GPS. [40]

4.4.2 MPU-6050

MPU-6050 je senzor, který kombinuje tříosý akcelerometr a tříosý gyroskop. Vyznačuje se nízkou spotřebou a nízkou cenou, které vedou k častému používání v chytrých telefonech nebo tabletech. Pro provádění výpočtů z gyroskopu a akcelerometru je přítomen DMP (*Digital Motion Procesor*).

K čipu lze externě připojit magnetometr, který je propojen přes I²C sběrnici. Použití tohoto modulu je žádoucí z důvodu potřeby měření náklonu, rychlosti a otřesů, které zajišťuje akcelerometr. Akcelerometr je vhodné kombinovat s gyroskopem, který nám udává, o kolik se změnil úhel desky se senzorem. Pro vyšší stabilizaci dronu je vhodné použít více senzorů najednou. Modul také obsahuje teploměr, který však neudává přesnou hodnotu okolní teploty a je ovlivněna teplotou samotného čipu, takže ho nelze použít k přesnému měření.

Modul nám poskytuje tzv. *"raw hodnoty"* jednotlivých os akcelerometru a gyroskopu, které nejsou nijak přepočítané. Pro modul je implementována knihovna, která umožňuje snadnější používání ve vývojovém prostředí Arduino. Výhodou tohoto senzoru je programovatelné přerušení. Souhrn parametrů viz tabulka 4.2. [12]



Obrázek 4.1: Gyroskop s akcelerometrem pro Arduino. [12]

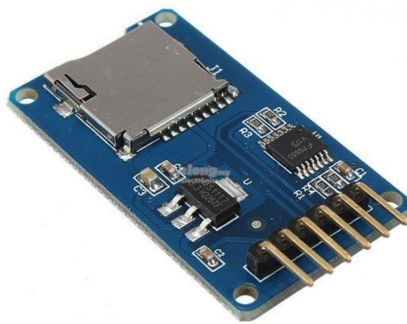
Použitý čip	MPU-6050
Napájecí napětí	3-5 V
Komunikační rozhraní	I ² C
AD převodník	16 bitový
Rozsah gyroskopu [°/s]	+250, +500, +1000, +2000
Rozsah akcelerometru [g]	± 2, ± 4, ± 8, ± 16
Rozměry [mm]	21 x 15 x 1,2
Hmotnost [g]	3

Tabulka 4.2: Parametry MPU-6050. [12]

4.5 Modul pro SD kartu

Pro záznam dat byla zvolena SD karta, pro kterou je připraven modul, který komunikuje s vývojovými deskami Arduino pomocí rozhraní SPI. Na kartu jsou ukládána data o dráze letu do souboru ve formátu CSV. Modul umožňuje použít karty až do velikosti 16 GB a data jsou organizována pomocí souborového systému FAT.

Modul pracuje na napětí 5 V a pro komunikaci využívá čtyři piny (MISO, MOSI, CS a SCK). Podporuje formáty karet MicroSDHC a MicroSD.



Obrázek 4.2: Modul pro SD kartu. [1]

4.6 Prolific PL2303TA

USB konvertor poskytuje sériové asynchronní připojení typu full-duplex s připojením libovolného USB zařízení. Konvertor zajišťuje přenos velkých dat a automaticky řídí datový provoz, a umožňuje tak větší výkon než rozhraní UART. Přenosová rychlost je dostačující pro komunikaci s GPS modulem a činí 115 200 bps. Vyznačuje se velmi malou spotřebou a je vhodný pro použití právě s kombinací GPS modulu nebo s různými kapesními zařízeními, popřípadě s tiskárnami.

Konvertor byl použit z důvodu komunikace s aplikací u-Center, který funguje pod operačním systémem Windows, který běžel na virtuálním stroji, pro testování GPS modulů. Pro správné fungování konvertoru bylo nutné doinstalovat příslušné ovladače z webových stránek výrobce.



Obrázek 4.3: USB konvertor PL2303TA. [8]

Kapitola 5

Statické testování GNSS systémů a GNSS modulů

Cílem této kapitoly bylo testování přesnosti daných modulů a vliv použití GNSS systémů na přesnost. Testování modulů bylo prováděno jak staticky, tak dynamicky. Statické testování bylo prováděno v Brně na Králově Poli. Pro testování přesnosti byla použita aplikace u-Center. Dynamické testování bylo prováděno pomocí dronu a osobního automobilu a bude popsáno v následující části.

Pro měření přesnosti obou GPS modulů bylo vhodné provádět měření v jeden den tak, aby časové rozmezí mezi měřeními bylo co nejkratší. Tím byly zajištěny podobné podmínky pro oba moduly. Měření je ovlivněno mnoho okolními vlivy jako je - stav družic, který říká, jestli družice udává správnou polohu, síla signálu, při špatné viditelnosti bude docházet k velkým odchylkám při fixaci pozice, vliv atmosféry, konkrétně ionosféra a troposféra ovlivňující vysílané signály a důležitá je také metoda měření, kterou zvolíme (např. fázové měření).

Během měření byly oba moduly v těsné blízkosti umístěny na otevřeném prostranství panelového domu tak, aby byla zajištěna, co nejlepší viditelnost oblohy. Nejdříve byl testován modul MAX-M8Q, který byl připojen pomocí USB konvertoru, který byl popsán v části 4.6, do počítače a stejným způsobem probíhalo testování modulu NEO-M8N. Pomocí aplikace u-Center pak byla zaznamenávána data po dobu asi 10 minut. Pomocí aplikace byl proveden záznam dat a po nasnímaní dostatek hodnot byly hodnoty uloženy do souboru pro další zpracování. Nastavení obou modulů bylo ponecháno tak, jak to dodává výrobce s přenosovou rychlostí 9600 baudů. Při prvním měření byla zaznamenávána data pomocí navigačních systémů GPS. Druhé měření bylo prováděno pomocí kombinace systému GPS a Glonass.

Naměřená data byla zpracovávána v aplikaci Excel, která poskytla potřebné funkce pro vykreslení a analýzu dat. Do grafů byl zanesen statický bod a body, které představovaly zaměření pozice pomocí navigačních modulů.

Testované moduly (viz. tabulka 5.1).

Název	NEO-M8N	MAX-M8Q
GNSS	GPS, Glonass, Beidou, Galileo, SBAS, QZSS	GPS, Glonass, Beidou, Galileo
Frekvenční pásma	L1, G1, B1, E1	L1, L10F, B1, E1B
Rozhraní	USB, UART, SPI, DDC	UART, DDC
Frekvence	10 Hz	10 Hz
Typ měření	kódové	kódové
Napětí	2,7 - 3,6 V	2,7 - 3,6 V
Přesnost	200 cm	250 cm
Použití	Profesionální	Profesionální

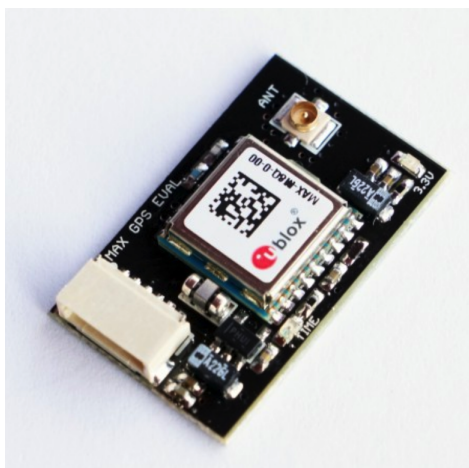
Tabulka 5.1: Parametry testovaných modulů.

5.1 U-Blox MAX-M8Q

Prvním testovaným modulem byl modul MAX-M8Q, který umožňuje příjem dat ze satelitů systémů GPS, Glonass, Galileo a Beidou. Modul se řadí mezi nízkonákladové senzory, které se používají hlavně v automobilovém průmyslu. Přesnost modulu, kterou udává výrobce je přibližně dva a půl metru. Pro příjem dat lze použít aktivní nebo pasivní anténu, v našem případě byla použita menší aktivní anténa, která byla dodána společně s modulem. Doba fixace dat, kterou výrobce udává je asi 26 sekund pro tzv. studený start, což bylo nutné otestovat.

Komunikace modulu je zajištěna pomocí rozhraní UART a DDC a pracuje na doporučeném napětí 3,3 V.

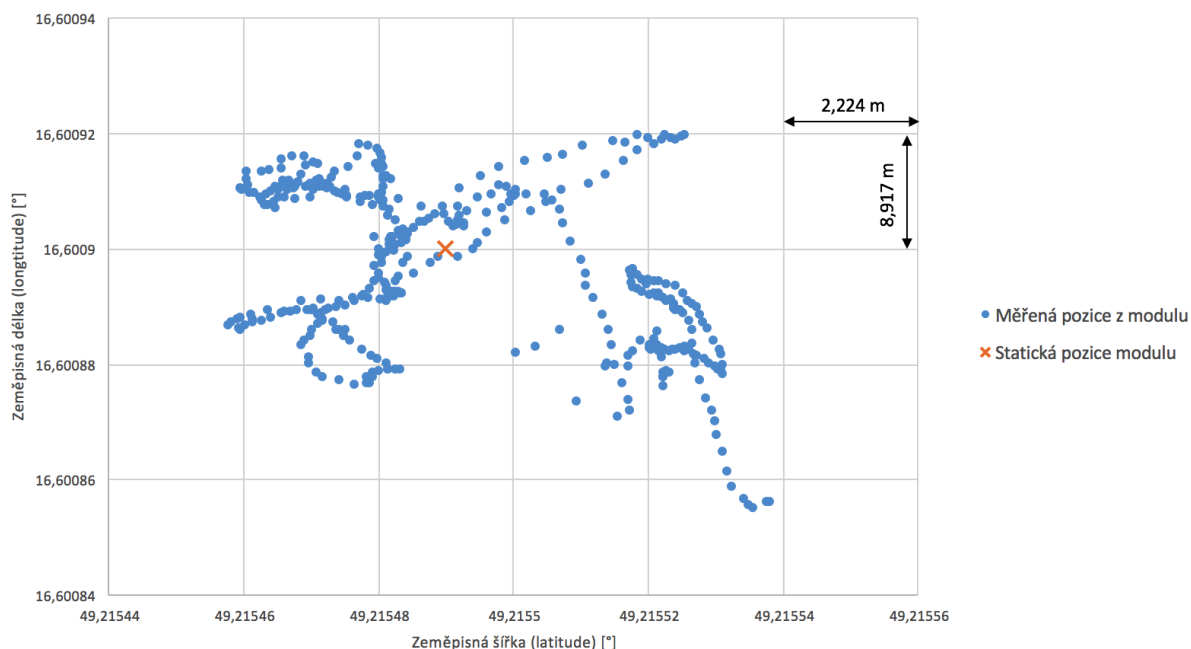
Pro statické testování přesnosti modulu byla využita aplikace u-Center od firmy u-blox, která poskytuje i službu tzv. *AssistNow* a poskytuje korekční data přes internet.



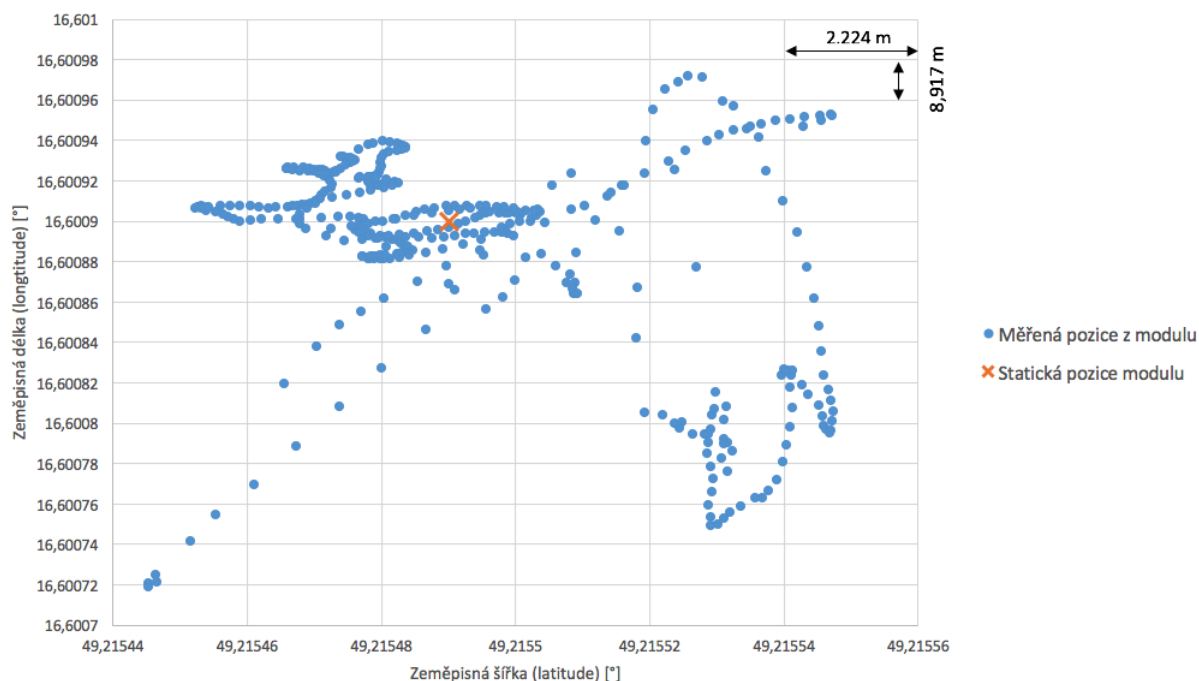
Obrázek 5.1: GPS modul u-blox MAX-M8Q. [9]

První testy modulu byly zaměřeny na určení statické pozice modulu. Měření bylo prováděno pro dvě konfigurace modulu - první konfigurace spočívala v určení pozice pouze pomocí satelitů GPS viz. obrázek 5.2. Dále bylo pozorováno, jak dlouho trvá fixace satelitů. V prvním případě byl čas fixace přibližně 35 sekund s tím, že výrobce udává dobu fixace 29 sekund pro tzv. studený start pro satelity GPS. Na obrázku 5.3 lze vidět zaměření pozice pomocí satelitů GPS a Glonass. Doba fixace pro kombinaci GPS a Glonass byla 28 sekund a výrobce udává 26 sekund pro studený start. Test GNSS systémů a jejich vliv na určení pozice byl proveden v časovém rozpětí 20 minut z důvodu stejné konstelace satelitů. Cena modulu se pohybuje kolem 300 Kč, takže je vhodnější do nízkonákladových zařízení, které nepotřebují znát úplně přesnou polohu v řádu centimetrů.

I když modul umožňuje příjem i dalších GNSS systémů, nebylo možné je otestovat v našich podmínkách, jelikož pro systém Galileo by byla potřeba speciální anténa a systém Beidou nefunguje pro Evropu.



Obrázek 5.2: Určení statické pozice modulu pomocí GPS.



Obrázek 5.3: Určení statické pozice modulu pomocí GPS a Glonass.

Z výsledků měření je vidět, že modul z počátku měřil velmi přesnou pozici modulu, ale s postupem času se začaly odchylky v měření zvětšovat a docházelo k větší nepřesnosti. Použití modulu na lokalizaci dronu by nebylo příliš vhodné, protože modul byl nestabilní.

5.2 U-Blox NEO-M8N

Druhým modulem, který byl testován byl NEO-M8N, který souběžně zpracovává data až z pěti GNSS – GPS, Glonass, Galileo, Beidou a QZSS. Díky kombinaci těchto systémů modul umožňuje velmi vysokou přesnost pozice zařízení, na kterém je modul připevněn při zachování nízké spotřeby energie. Udávaná přesnost tohoto modulu je přibližně dva metry a měl by být přesnější než modul MAX-M8Q. Jedná se o modul, který je o dvě řady novější než populární NEO-6M. Výhody tohoto modulu jsou převážně v podpoře ochrany integrity dat a v jednoduchosti nastavení uživatelského rozhraní pro dané aplikace. Další nespornou výhodou oproti prvnímu modulu by měla být rychlost fixace pozice, která je důležitá pro bezpilotní letouny. Je používán převážně v automobilovém průmyslu. Modul má možnost jednoduché aktualizace firmwaru, kterou první modul neumožňuje. Nevýhodou modulu je vyšší cena, která se pohybuje kolem 600 Kč.

Modul komunikuje pomocí rozhraní UART, USB, SPI nebo DDC (zpětně kompatibilní s I²C) a je chráněn SAW filtrem (filtr s povrchovou akustickou vlnou) proti rušení, který první testovaný modul postrádá. Pro příjem dat, lze také využít aktivní nebo pasivní anténu, a stejně jako u prvního modulu byla využita aktivní anténa.

Doporučená komunikační úroveň napětí je 3,3V, ale modul je schopný pracovat i s 5V bez nutnosti použití převodníků.

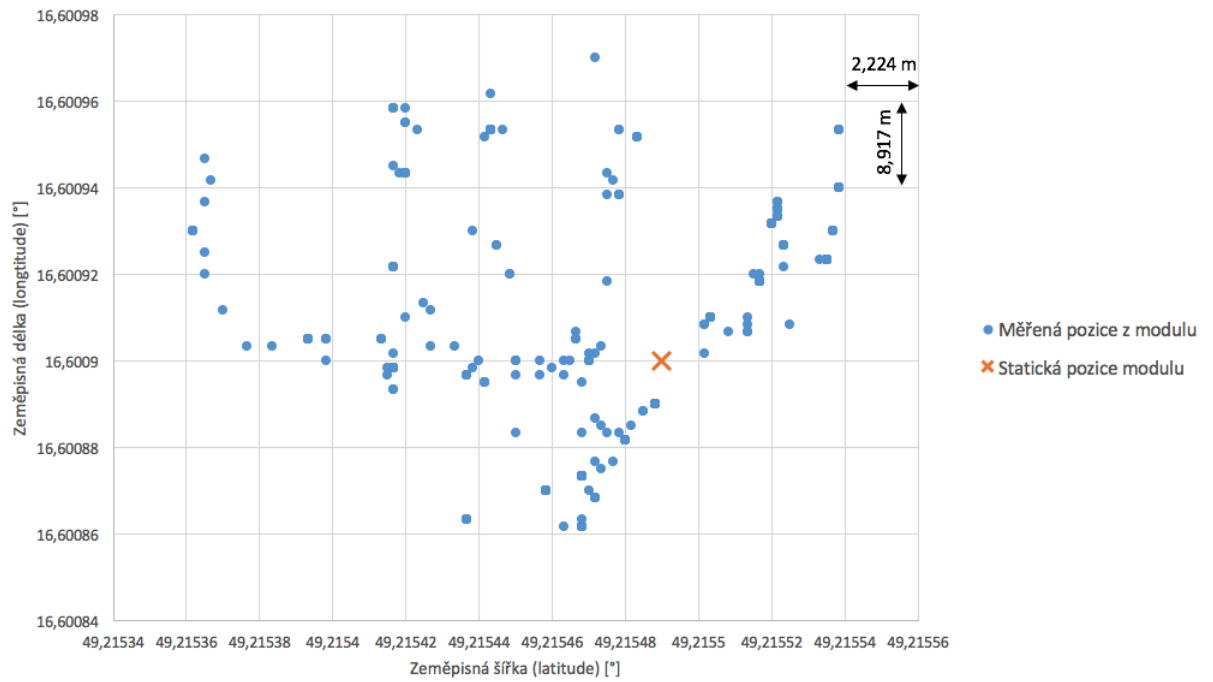
Testování přesnosti bylo znovu prováděno pomocí aplikace u-Center.



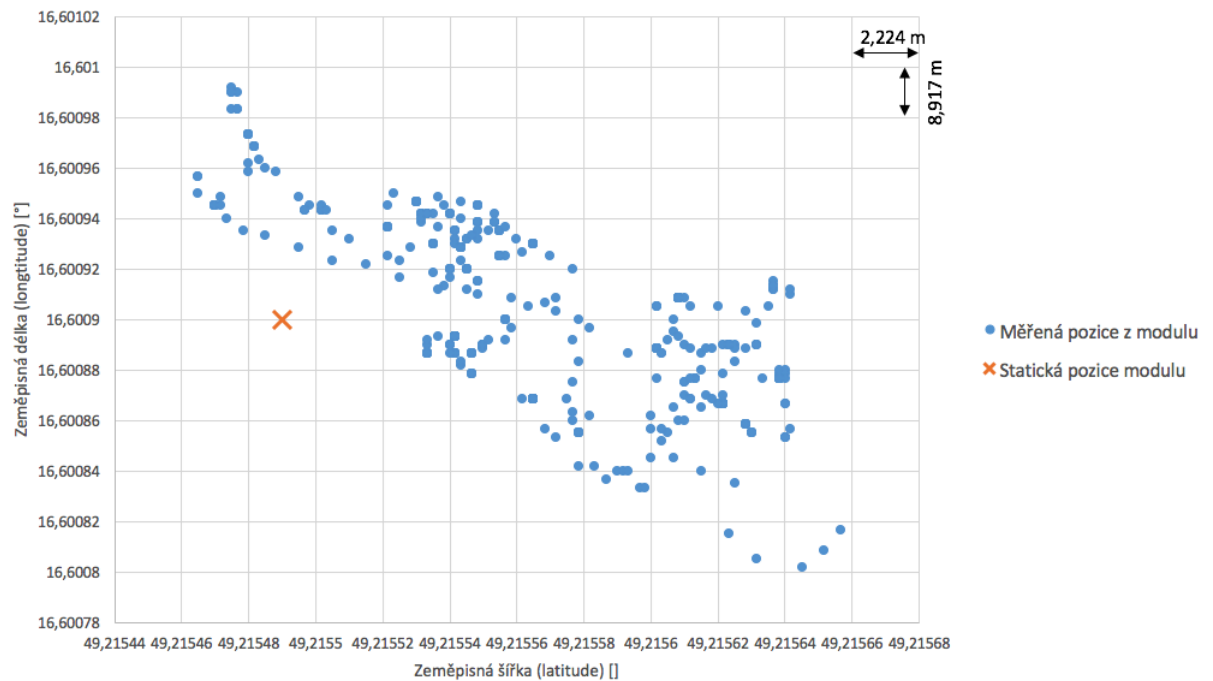
Obrázek 5.4: GPS modul u-blox NEO-M8N. [10]

Při testování druhého modulu byl použit stejný postup jako u prvního testovaného modulu. První test byl opět zaměřen na určení přesnosti pouze pomocí satelitů GPS a je zobrazen na obrázku 5.5. Doba fixace pro studený start pro GPS satelity byla 27 sekund a výrobce udává dobu fixace 29 sekund. Zároveň byla znovu testována konfigurace pro satelity GPS a Glonass a určení pozice pomocí nich, která je zobrazena na obrázku 5.6. Fixační doba byla 27 sekund shodná s udávanou dobou od výrobce.

Testování využití satelitů GPS a Glonass probíhalo v časovém rozpětí 20 minut, aby byly zachovány shodné podmínky. Ani v tomto případě nebylo možné otestovat systémy Galileo a Beidou, jelikož pro systém Galileo nebyla dostupná dostatečně silná anténa a systém Beidou nefunguje pro Evropu.



Obrázek 5.5: Určení statické pozice modulu pomocí GPS.



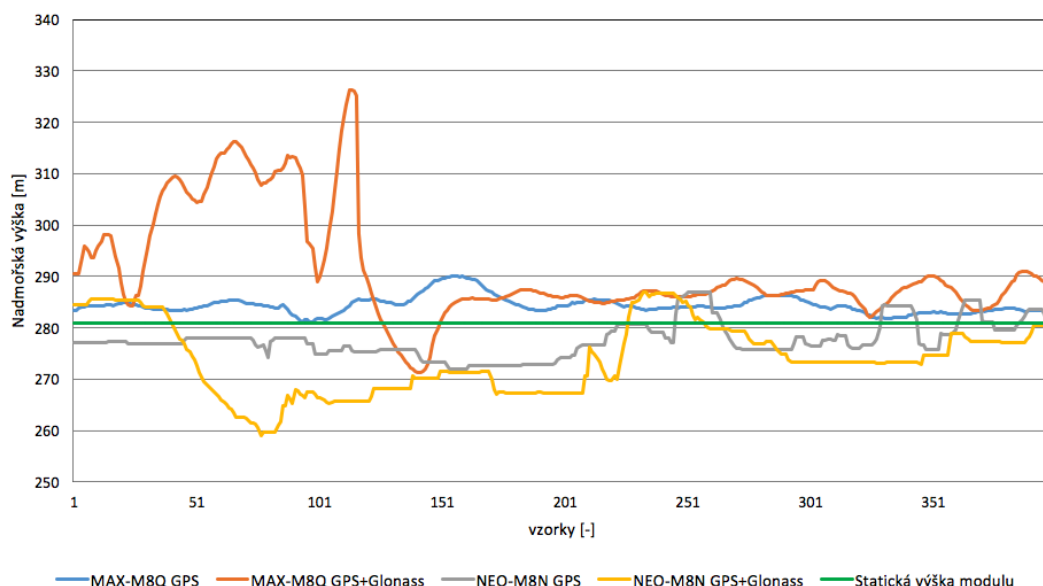
Obrázek 5.6: Určení statické pozice modulu pomocí GPS a Glonass.

V grafu je zobrazeno, že modul neurčil přesnou pozici. Postupem času bylo měření stále přesnější a modul soustředil záznam pozice do jednoho místa a stabilněji než první testovaný modul. Bylo by vhodné použít silnější aktivní anténu, aby byla pozice zaměřena ještě přesněji.

5.3 Určení výšky navigačních modulů

Další částí testování bylo zjistit, jestli je vhodné použít navigační moduly i pro určení výšky dronu, abychom se vyhnuli použití dalšího modulu v případě použití na dronu. Moduly byly ponechány ve výchozí konfiguraci, přenos dat byl 9600 baudů a bylo změřeno, jak velký vliv má kombinace GNSS systémů na určení výšky. Bylo nasbíráno 400 vzorků/zpráv, které odpovídají časovému rozpětí 6,5 minuty.

Výsledky pro porovnání výšky obou modulů jsou zobrazeny v grafu 5.7, kde je vidět průběh fixace nadmořské výšky při použití jen GPS a použití kombinace GPS a Glonass.

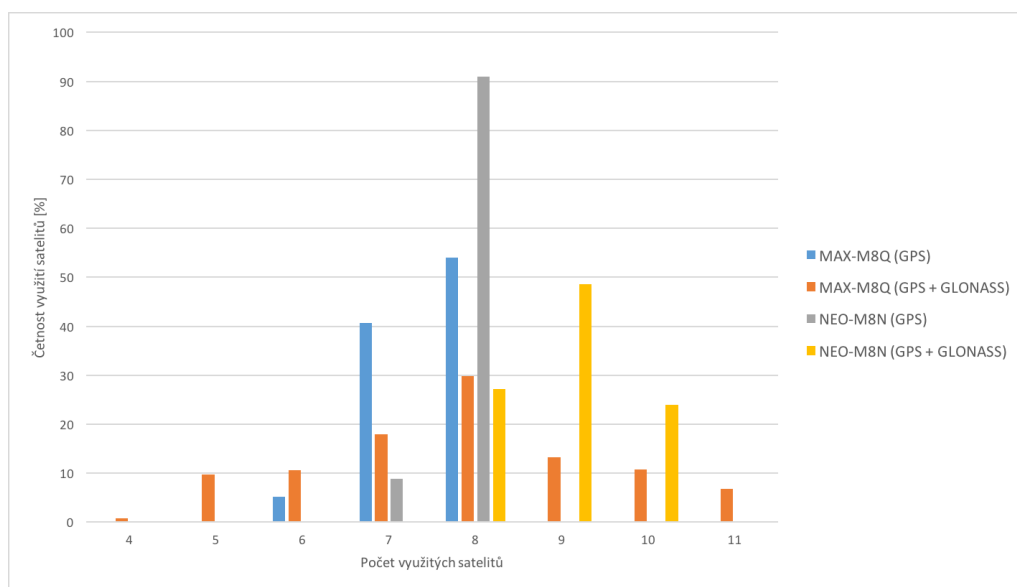


Obrázek 5.7: Určení nadmořské výšky modulů.

Z výsledků je vidět, že nejvhodnější modul pro určení výšky je modul NEO-M8N, který má menší odchylky při měření. Pokud by byla použita silnější, ale větší anténa, byly by odstraněny větší odchylky při měření. Použití navigačního modulu pro určení výšky ale není vhodné z důvodu výpadku signálu. Pokud by došlo k výpadku signálu, dron by ztratil informace o výšce a mohlo by dojít k pádu. Modul je tedy vhodné použít na nejvýše pro zaznamenávání trajektorie letu a postačí k tomu jen informace ze satelitů GPS.

5.4 Využité satelity při testování

V této části bylo cílem zjistit, kolik satelitů reálně využívají oba moduly pro určení a fixaci své pozice a jestli využití kombinace systémů mělo vliv na měření. Byly zaznamenány pouze satelity systémů GPS a Glonass z důvodu nedostupného příslušenství pro měření ostatních systémů. V prvním měření byl testován pouze systém GPS a ve druhém testu kombinace GPS a Glonass. Výsledky měření jsou znázorněny na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Počet využitých GNSS satelitů moduly.

Testování probíhalo v časovém rozmezí jedné hodiny, aby byly znovu zachovány stejné podmínky. Z výsledků měření je vidět, že moduly jsou schopny využívat až 11 satelitů na našem území z celkových 56 satelitů (32 satelitů pro GPS a 24 satelitů pro Glonass) pro konfiguraci, která byla použita. Modul NEO-M8N je schopen využívat více satelitů po delší dobu v kombinaci GPS a Glonass z toho důvodu je schopen určit přesnější pozici. Po celou dobu testování byla pozice zaměřována minimálně ze 3 satelitů, které jsou potřebné pro fixaci pozice.

Z měření dále vyplývá, že použití kombinace GPS a Glonass má vliv na přesnější určení pozice než při použití pouze satelitů GPS.

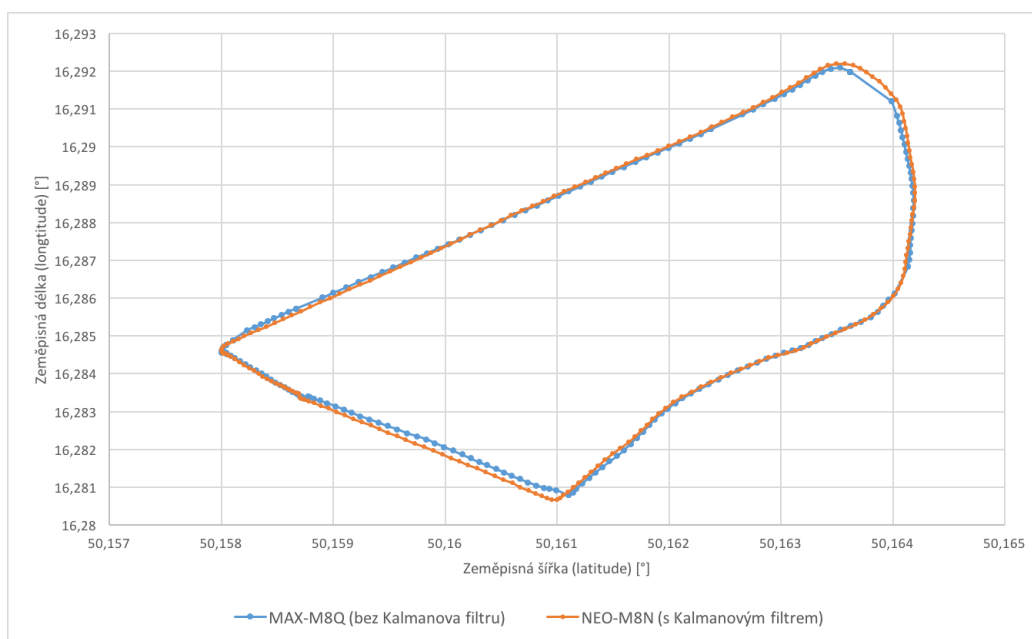
5.5 Dynamické testování modulů

Test modulů v pohybu byl proveden v okolí města Rychnov nad Kněžnou (viz. Obrázek 5.9) s využitím osobního automobilu, kde byly moduly připevněny na přístrojovou desku automobilu. Pro zachování okolních podmínek a konstelace satelitů byl test proveden v průběhu 30 minut. Lokalita byla vybrána z důvodu menšího elektromagnetického rušení z obytných částí. Oba moduly byly připojeny do počítače pomocí USB konvertoru Prolific PL2303TA a data byla snímána pomocí aplikace u-Center.



Obrázek 5.9: Trasa pro testování modulů v pohybu.

Během cesty bylo zaznamenáno 230 vzorků, což odpovídá necelým 4 minutám jízdy. Tyto vzorky byly analyzovány pomocí aplikace Excel. Pozorovanými parametry byly souřadnice, rychlost, nadmořská výška, počet využitých satelitů a ztrátovost signálu modulů. Výsledek měření a porovnání přesnosti obou modulů je vidět na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Porovnání přesnosti modulů v pohybu.

Z výsledného grafu je vidět, že oba moduly se chovají velmi podobně a přesnost je totožná. Modul NEO-M8N však pracoval spolehlivěji, stabilněji a přesněji, jelikož modul MAX-M8Q během testu ztrácel signál z důvodu nízkého počtu využitých satelitů (což bylo vidět i na obrázku 5.8 při statickém testování). Došlo tedy k chybnému zaměření pozice. Z dynamického testování vyplynulo, že pro náš systém bude

vhodnější zvolit modul NEO-M8N, který je pro tento systém zcela dostačující a to především kvůli stabilitě i přes využití slabší antény.

Kapitola 6

Popis systému

Byl vytvořen systém, ve kterém byla základem vývojová deska Arduino Due (viz. část 4.2) a výše zmíněný navigační modul NEO-M8N, který byl přesnější. Modul je připojen na desku Arduino pomocí sériové linky, dále se zde nachází IMU jednotka složená z gyroskopu a akcelerometru. Všechna data ze senzorů byla ukládána na SD kartu. Toto zapojení lze považovat za tzv. *black box* pro bezpilotní letouny, jelikož máme všechna potřebná data o poloze dronu a při havárii dronu, lze analyzovat, proč došlo k pádu a na jakém místě. Výrobci dronů neposkytují úplné záznamy o letu. Systém je napájen z klasických AA baterií, které mají napětí 9 V doporučených pro napájení vývojové desky.

Pro účely testování byly použity funkce *waypoints* a *course lock*, které poskytuje aplikace DJI. Byly vymezeny různé dráhy letu a poté sledována spolehlivost systému. Byly provedeny i další lety bez určených *waypoints* bodů. Drony DJI využívají velice přesnou GPS s velmi pokročilými algoritmy pro určení pozice. Dále byly provedeny 3 testovací lety a bylo pozorováno chování systému.

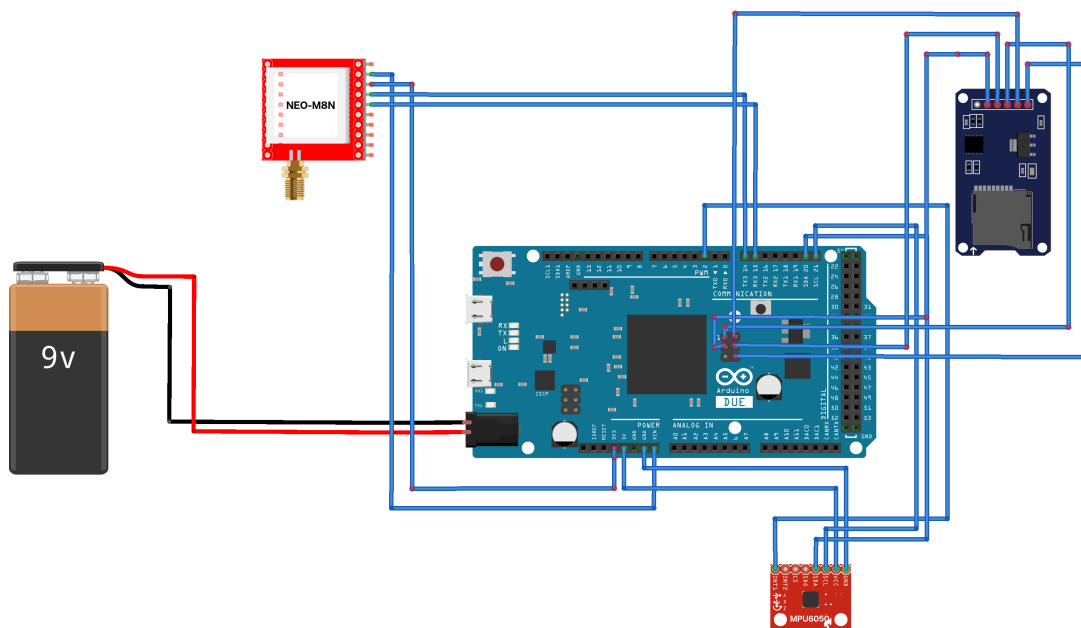
Po ukončení letu byla uložena všechna nasnímaná data z SD karty do počítače. Očekávan byl grafický výstup, ke kterému byla využita aplikace Google Earth, kde byly vykresleny jednotlivé body letu. Po rozkliknutí jednotlivých bodů v aplikaci lze zjistit informace o poloze dronu, jeho rychlosti, výšce a náklonu.



Obrázek 6.1: Grafický výstup z Google Earth.

6.1 Princip systému

Systém je řízen autonomně a není potřeba žádné interakce uživatele kromě zapojení napájení. Pokud bychom chtěli po letu začít ukládat data do dalšího souboru, lze stisknout tlačítko reset, který spustí systém od znova. Záznam dat je prováděn každých 250 milisekund a je řízen příchozími zprávami z GPS. Zprávy jsou zpracovávány pomocí knihovny TinyGPS++, která umožňuje dekodování příchozích dat a poskytuje nám potřebná data pro záznam letu jako jsou souřadnice, rychlost, výška, atd. Pro získání dat z akcelerometru a gyroskopu je použita knihovna pro senzor MPU6050, která nám ale poskytuje pouze tzv. *"raw hodnoty"* a je potřeba tato data přepočítat pro získání náklonu. Pro získání přesného náklonu byl použit lineární filtr a jeho činnost bude popsána v další části. Nevýhodou tohoto systému je hardwarový reset, který může být způsoben výpadkem napájení některé části systému. V běžném stavu systém neustále zaznamenává data, dokud není přerušeno napájení nebo stisknuto tlačítko pro reset.



Obrázek 6.2: Schéma zapojení.

6.2 Navigační modul

6.2.1 Protokol NMEA 0183

Protokol NMEA 0183 - *National Marine Electronics Association* popisuje formát přenášených dat z GNSS a dále specifikuje způsob zapojení a přenos dat po sériové lince.

Asociace NMEA neposkytuje bezplatné používání tohoto komunikačního standardu. Cena se pohybuje v rozmezí několika stovek dolarů, což odpovídá 150 až 525 dolarům. Dnes jsou však dostupné alespoň neúplné specifikace protokolu od různých výrobců. Na internetu lze nalézt spoustu verzí, které však nejsou oficiální a nemusejí pocházet z důvěryhodných zdrojů.

6.2.2 Formát a datový rámec přenášených dat

Datové rámce protokolu NMEA 0183 jsou tvořeny jedním start bitem, osmi datovými bity a jedním stop bitem. Jsou přenášeny asynchronně přenosovou rychlostí 4800 baudů, popřípadě 9600 baudů nebo vyšší.

Formát dat je organizován do vět, které jsou tvořeny pouze tisknutelnými ASCII znaky doplněné znaky konce řádku <CR> a <LF>. Každá věta začíná znakem "\$" a končí sekvencí <CR><LF>. Protokol obsahuje různé druhy vět, které nesou určité typy informací. Jsou to zprávy typu:

- **GGA** - (*Global Positioning System Fixed Data*) - věta obsahující čas, polohu GPS a fixní data.
- **GSV** - (*Global Navigation Satellite System Satellites in View*) - věta standardu NMEA 0183 obsahující informace o aktivních satelitech.

- **GSA** - (*Global Navigation Satellite System Dilution of Precision and Active*) - věta standardu obsahující informace o GPS signálu.
- **VTG** - (*Course Over Ground and Ground Speed*) - věta obsahující informace kurzu a rychlosti vůči zemskému povrchu.
- **RMC** - (*Recommended Minimum Specific Global Navigation Satellite System Data*) - věta obsahující minimální doporučenou sadu hodnot pro navigační přístroje.

Družicové přijímače jsou identifikovány písmeny **GP** (GPS), **GL** (Glonass), **BD** (Beidou), **GA** (Galileo) a **GN** (kombinace více systémů).

6.2.3 Komunikace s navigačním modulem

Pro komunikaci s navigačním modulem byla použita knihovna TinyGPS++, která zajišťuje čtení potřebných zpráv protokolu NMEA a je volně dostupná z online zdrojů a je přiložena na nosiči CD. Z knihovny byly použity a modifikovaný tři funkce (viz. kód systému) potřebné pro zpracování zpráv z GPS modulu, které umožňují parsování datového typu integer, float a datumu. Modul je s vývojovou deskou propojen pomocí sériové linky na pinech TX a RX. Zapojení navigačního modulu lze vidět na obrázku 6.2. Přenosová rychlost modulu je nastavena na výchozí hodnotu 9600 baudů, která je doporučena výrobcem, pokud bychom ji chtěli změnit, musíme to provést v konfigurační aplikaci od výrobce.

Knihovna je založena na čtení zpráv NMEA protokolu, provádí testování platnosti dat a převádí kódové zprávy do čitelné podoby. Zprávy musí být kontrolovány pomocí kontrolního součtu, abychom zjistili, že data jsou validní. Validita dat se dá určit z vět \$GPRMC, která obsahuje příznak o platnosti "V" (neplatné) nebo "A" (aktivní). V dalším případě je validita dat obsažena ve zprávě \$GPGGA, která hlásí úspěšnost fixace, pokud je "0", pak jsou informace o poloze a nadmořské výšce vyloučeny. Může trvat několik minut, než dojde ke správné fixaci dat.

6.3 Komunikace s MPU6050

Pro zjištění náklonu dronu je použit výše zmíněný modul MPU6050, který je propojen s Arduinem pomocí dvou pinů - SDA a SCL, které jsou přivedeny na analogové piny 20 a 21. Jako referenční napětí bylo použito doporučené napětí 3,3 V. Při použití napětí 5 V by mohlo dojít ke zkreslení dat, a docházelo by tak k větším odchylkám při měření. Zapojení modulu lze vidět na obrázku 6.2.

Pro komunikaci s modulem byla použita volně dostupná knihovna *MPU6050.h*. Knihovnu bylo vhodné použít pro počáteční inicializaci komunikace s vývojovou deskou a je přiložena na nosiči CD. Zbytek komunikace byl zajištěn pomocí standardní knihovny *Wire.h*, která je dostupná v rámci vývojového prostředí Arduino IDE. Získání hodnot ze senzoru probíhá pomocí načtení prvních 14 bytů, ze kterých jsou získány hodnoty os x , y a z .

6.3.1 Filtrování hodnot z akcelerometru

Zapojení samotného modulu bylo popsáno v části 6.3, ale abychom mohli získat z přečtených hodnot užitečné informace, bylo nutné data vyfiltrovat a přepočítat na stupně. Důležitým požadavkem bylo, aby filtr umožňoval co nejrychlejší a nejpresnější reakci na změnu polohy, jelikož záznam dat je prováděn s frekvencí 4 Hz, což odpovídá zaznamenání hodnot každých 250 milisekund.

Nejprve bylo zapotřebí nasnímat vzorky z akcelerometru a vyjádřit jejich průměr. Vzorkovací frekvence byla zvolena 1 kHz. Pro vyjádření pozice dronu byly použity vzorce pro výpočet náklonů v ose x a ose y . Velikosti náklonů jsou vyjádřeny vzorci [23]:

$$x = \arctan\left(\frac{G_y}{\sqrt{G_x^2 + G_z^2}}\right), y = \arctan\left(\frac{-G_x}{G_z}\right) \quad (6.1)$$

Rozsah v ose x je od -90° do 90° . Na rozdíl od velikostí úhlů v ose y , kde její rozsah je od -180° do 180° .

Pokud bychom aplikovali na výpočet náklonu pouze tyto vzorce, hodnoty by byly zkreslené a trvalo by jejich ustálení. Proto byl aplikován lineární filtr, který eliminuje vysokofrekvenční signál. Hodnoty jsou filtrovány pomocí vzorce:

$$y_t = \alpha \cdot x_t + (1 - \alpha) \cdot y_{t-1} \quad (6.2)$$

kde y_t je filtrovaný signál, y_{t-1} je předchozí vzorek, x_t je přečtená hodnota akcelerometru a α je vyhlazovací faktor, který byl zvolen na hodnotu 0.5, jelikož příliš nízká hodnota by mohla způsobovat horší stabilitu filtru a delší dobu ustálení. Hodnota byla zjištěna experimentálně.

6.4 Modul pro SD kartu

Modul pro SD kartu je připojen sběrnici SPI pomocí čtyř komunikačních pinů, pro které jsou na Arduinu Due vyhrazeny odpovídající piny MISO, MOSI, CS a SCK a dva piny pro napájení na 5 V. Pro inicializaci a komunikaci s SD kartou byla použita standartní knihovna *SPI.h* a knihovna *SD.h*, která je přiložena na nosiči CD a poskytují potřebné funkce pro navázání spojení a ukládání dat na kartu. SD karta musí být ve formátu FAT a může mít velikost až 16 GB. Zapojení modulu lze vidět na obrázku 6.2.

6.4.1 Formát a výstup dat do souboru

Bylo nutné zajistit správný formát dat, aby bylo možné využít zaznamenaná data v aplikaci Google Earth. Každý záznam letu obsahuje časové údaje, zeměpisnou délku a zeměpisnou šířku v desetinném čísle, nadmořskou výšku, rychlost a náklon v osách x a y . Náklony jsou celá čísla, přepočítaná na stupně. Hodnota rychlosti je desetinné

číslo. Soubor je generován ve formátu CSV, aby byl možný import i do jiných aplikací než Google Earth.

Import výstupního souboru a zaznamenaných dat do počítače lze provést pomocí adaptéru na SD kartu. Data jsou formátována v takové podobě, aby nemusela být znovu přeformátována a mohla se hned vložit do aplikace s mapovými podklady. Data jsou uložena v souboru s názvem *log[číslo].csv*.

6.4.2 Formát snímaných dat

Datum a čas jsou formátovány v podobě mm/dd/yyyy (m - měsíc, d - den, y - rok) hh:mm:ss (h - hodina, m - minuta, s - sekunda) a obsahuje je každý zaznamenaný bod. Souřadnice GPS jsou ve formátu ss.mmmmmm (s - stupně, m - minuty). Nadmořská výška, ve které se dron nachází je ukládána v metrech. Rychlost je vyjádřena v desetinném čísle a udává rychlost v kilometrech za sekundu. Hodnoty náklonu, stoupání a klesání jsou převedeny na stupně v celých číslech. Pro osu x kladné hodnoty představují, že před dronu je výše než zád a naopak. Osa y odpovídá úhlu pravého a levého náklonu dronu. Kladné hodnoty osy y říkají, že levá strana je výše než pravá strana dronu a záporné hodnoty udávají, že pravá strana je výše než levá. Záleží však na tom, jak je senzor umístěn. Dron by však neměl přesahovat hodnoty 30 stupňů náklonu pro obě osy při běžném létání.

6.5 První let

Systém byl připevněn na můj dron DJI Phantom 3 Advanced z důvodu nedostupnosti školního dronu DJI M600. Během prvního letu byla testována funkčnost celého systému, tzn. ukládání dat, fixace pozice, zaměření výšky a určení rychlosti a náklonu. Všechny lety byly prováděny v bezpečné vzdálenosti od obytných částí a obyvatel. Po provedení prvního testovacího letu byl upraven formát výstupních dat pro import do aplikace Google Earth. Velikost výstupního souboru CSV, který trval necelé dvě minuty, byla 25 kB a díky tomu bylo zjištěno, že bychom mohli zaznamenat až 21 300 hodin záznamu. Zaznamenáno bylo 324 vzorků dat, což odpovídalo necelým dvěma minutám letu, ze kterých byla analyzována a importována data do aplikace Google Earth.

Během letu nebyly zaznamenány žádné výpadky GPS modulu ani jiných částí. Let byl proveden náhodně bez průletových bodů. Testování trochu komplikovaly zhoršené povětrnostní podmínky, data však byla zaznamenána korektně. Výsledky prvního letu lze vidět na obrázku 6.3 a 6.4.



Obrázek 6.3: První zkušební let.



Obrázek 6.4: První zkušební let a zobrazení výšky.

6.6 Druhý let

Druhý let byl proveden následně po prvním letu v co nejkratším čase. U tohoto letu byla použita funkce aplikace DJI GO a to funkce *waypoints*. Byly určeny čtyři průletové body, kterými dron proletěl dvakrát za sebou, aby bylo možné porovnat přesnost zaměření modulu a sledovat trajektorii letu. Trajektorie letu byly velmi podobné a

nepřesnosti byly způsobeny převážně větrem. Let byl proveden v menší výšce z důvodu bezpečnosti, jelikož systém byl na dron těžký a byla zhoršena ovladatelnost dronu.

Při druhém letu byly pozorovány hodnoty náklonu, které správně odpovídaly náklonům v ose x a v ose y . Odchyšky náklonu během letu byly ± 10 stupňů pro obě osy, bez větru by byla tato odchyška menší. Rychlost dronu byla šest až sedm kilometrů za hodinu. Test byl proveden úspěšně a nebyly zjištěny žádné výpadky GPS signálu nebo problém se záznamem. Během letu bylo zaznamenáno 983 vzorků, což odpovídalo přibližně pěti minutám letu a velikost výstupního souboru byla 70 kB.



Obrázek 6.5: Druhý zkušební let s funkcí *waypoints*.

6.7 Třetí let

Třetí a poslední let, na kterém byla vyzkoušena funkčnost celého systému byl proveden pomocí funkce *course lock* v aplikaci DJI GO opět s dronem DJI Phantom 3 Advanced. Ta nám umožňovala udržet směr a rychlost dronu a letět přímo jedním fixním směrem. Po dosažení vzdálenosti asi 130 metrů byl dron vrácen na stejné místo. Na obrázku 6.6 lze vidět, jak moc se liší přesnost jedné trajektorie a je vidět trajektorie vzletu a přistání dronu. Ani během tohoto letu nebyly zaznamenány problémy v záznamu trajektorie ani výpadky GPS signálu. Hodnoty náklonu byly validní a stejně tak hodnoty GPS souřadnic, rychlosti, datum a výška. Let byl proveden od 284 metrů nadmořské výšky po 294 metrů nadmořské výšky, kterou zaznamenal GPS modul.



Obrázek 6.6: Třetí zkušební let s funkcí *course lock*.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s nejpoužívanějšími navigačními systémy a zjištění informací o aktuálním stavu vývoje v dnešní době, popsání způsobu využití navigačních systémů u dronů a dále navržení zpracování dat z modulu, který jsem vybral pro systém na základě předchozích testů.

Prostřednictvím dostupných publikací byly shrnuty nejdůležitější vlastnosti systémů GPS, Glonass, Galileo a Beidou a popsány principy navigace. Bylo nezbytné prostudovat potřebnou literaturu k pochopení funkčnosti jednotlivých systémů a principů fungování jako např. měření vzdálenosti, typy měření, struktura navigačních systémů a princip funkce diferenčních systémů. Seznámil jsem se s technologiemi, které využívá firma DJI pro svoje profesionální bezpilotní letouny a s vylepšeními těchto technologií jako je D-RTK.

Práce byla zaměřena na drony, kde byl popsán jejich vývoj, jednotlivé části a použití navigačních modulů a techniky pro navigaci dronů. Bylo vycházeno z vlastních zkušeností s drony a s jejich používáním. Vhodné bylo popsat i senzory, které jsou používány pro snímání polohy a funkce pro využití navigačních systémů.

Velká část této práce byla věnována testování dvou navigačních modulů, ze kterých byl na základě statického a dynamického testování vybrán přesnější a stabilnější modul, který mohl být použit pro bezpilotní letoun. Modul pak sloužil pro navržený systém, který byl využit jako záznamové zařízení, jehož součástí byla vývojová deska Arduino a senzory pro snímání polohy. Celkem bylo provedeno osm finálních testů měření přesností modulů.

Na závěr této práce jsem vytvořil výše zmíněný systém, který dokáže snímat polohová data z GPS modulu, z IMU jednotky a ukládat data na SD kartu. Pro vytvoření bylo nutné nastudovat informace o protokolu NMEA, výpočtech úhlů náklonu a komunikaci s jednotlivými moduly. Délka záznamu dat je závislá na velikosti SD karty, která v mém případě byla 16 GB a je možné takto zaznamenávat několik tisíc hodin. Systém je modulární, takže by bylo možné přidat další senzory pro rozšířenou funkcionalitu a implementovat například sonar nebo barometr pro přesné měření výšky a analýzu terénu. Je možné ho použít nejen na dronech, ale např. v letounech nebo automobilech. Systém pracoval spolehlivě a mohu považovat jeho vytvoření za úspěšné. Díky sérii testování jsem usoudil, že je možné ho použít jako záznamové zařízení na školním dronu DJI M600. Pro zajímavost celková cena takového systému by byla přibližně 1700 Kč včetně DPH.

Tato práce pro mě měla velký přínos z oblasti navigačních systémů a z oblasti využití různých polohových senzorů. Této tématice bych se chtěl věnovat i v magisterském studiu a v mé budoucí profesi, jelikož se o tyto věci ve volném čase zajímám a pracuji s nimi. Díky této práci jsem získal další zkušenosti s používáním dronů, jejich testováním a programováním mikrokontrolérů Arduino a jeho senzorů.

Tento projekt by mohl být základem pro budoucí práci pro vytvoření diferenčního systému, který by byl schopný určit přesnost bezpilotních letounů na jednotky centimetrů a mohl by být využit například pro přesné zaměření a analýzu terénu nebo budov. V tomto případě by bylo potřeba vytvořit mnohem komplexnější a složitější systém, který by však mohl využívat vývojové desky Arduino, se kterou mám zkušenosti. Chtěl bych integrovat moduly na menší plošný spoj, aby zapojení bylo co nejmenší a nejlehčí a nezatěžovalo tak dron. Na základě provedených testování modulů a systému mohu říct, že cíl práce byl splněn.

Literatura

- [1] *Arduino SPI ICSP Micro SD Card Adapter*. [Online; navštíveno 19.2.2018].
URL <https://www.lelong.com.my/arduino-spi-icsp-micro-sd-card-adapter-reader-module-stelectronics-190896112-2019-04-Sale-P.htm>
- [2] *DJI Flame Wheel F450 ARF Quadcopter Drone Combo Kit*. [Online; navštíveno 22.11.2017].
URL <https://www.amainhobbies.com/dji-flame-wheel-f450-arf-quadcopter-drone-combo-kit-dji-nzml-450/p297772>
- [3] *DJI Phantom 4 Pro Pro+ Main Control Unit*. [Online; navštíveno 22.11.2017].
URL <http://www.rc-recycler.com/dji-phantom-4-professional-pro-main-control-unit-anti-vibration-brackets-drone.html>
- [4] *ESC 20 Amp with SimonK*. [Online; navštíveno 23.11.2017].
URL <http://www.explorelabs.com/esc-20-amp-with-simonk>
- [5] *G3 RAY LI-POL 3000MAH/7,4 30/60C*. [Online; navštíveno 23.11.2017].
URL <https://www.rcprofi.cz/g3-ray-li-pol-3000mah-7-4-30-60c-prijimacovy-pack-22-2wh.html>
- [6] *GALILEO - Evropský globální navigační družicový systém*. [Online; navštíveno 6.12.2017].
URL <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/galileo/>
- [7] *Galileo to Go Live on Thursday*. [Online; navštíveno 16.10.2017].
URL <http://gpsworld.com/innovation-glonass-past-present-and-future/>
- [8] *PL2303TA USB-TTL*. [Online; navštíveno 10.2.2018].
URL <https://www.rpibolt.hu/spd/RPI-783477/PL2303TA-USB-TTL-Serial-Debug-kabel-Konzol-kabel-1>
- [9] *u-blox MAX-M8Q*. [Online; navštíveno 13.2.2018].
URL http://www.csgshop.com/product.php?id_product=178
- [10] *u-blox NEO-M8N*. [Online; navštíveno 10.2.2018].
URL https://www.banggood.com/NEO-M8N-Flight-Controller-GPS-Module-GYGPSV5-NEO-for-Pixhawk-APM-p-974362.html?cur_warehouse=CN
- [11] *Arduino.playground.cc: Arduino Due*. [Online; navštíveno 8.2.2018].
URL <https://store.arduino.cc/arduino-due>

- [12] Arduino.playground.cc: *MPU-6050 Accelerometer + Gyro* . [Online; navštíveno 8.2.2018].
URL <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>
- [13] Armstrong, M.: *Brushless Motor with Prop*. [Online; navštíveno 22.11.2017].
URL <https://grabcad.com/library/brushless-motor-with-prop-1>
- [14] Bezpalec, P.: *Lokalizace a navigace* . [Online; navštíveno 30.12.2017].
URL <https://publi.cz/books/231/Cover.html>
- [15] Bilker, M.: *The Quality of Real-time Kinematic (RTK) GPS Positioning*. Finnish Geodetic Institute, 2001, ISBN 9517112416.
- [16] Corrigan, F.: *Drone Waypoint GPS Navigation Technology And Uses Explained*. [Online; navštíveno 29.12.2017].
URL <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/drone-waypoint-gps-navigation-technology-explained/>
- [17] Czechspaceportal: *Ruský globální družicový navigační systém GLONASS* . [Online; navštíveno 21.3.2018].
URL <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/gnss-mimo-evropu/rusky-glonass/>
- [18] Doc. Ing. Jiří Šebesta, P.: *GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ SYSTÉMY* . [Online; navštíveno 1.12.2017].
URL http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Globalni_navigacni_systemy.pdf
- [19] Edelstein, A.: *Advances in magnetometry*. 2007, ISBN 165217.
- [20] El-Rabbany, A.: *Introduction to GPS: The Global Positioning System, Second Edition*. 2006, ISBN 978-1596930162.
- [21] ESA: *What is Galileo?* [Online; navštíveno 5.12.2017].
URL http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo
- [22] Evans, B. W.: *Beginning Arduino Programming*. Technology in Action, 2011, ISBN 978-1-4302-3777-8.
- [23] Groves, P. D.: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Artech House Books, 2013, ISBN 9781608070053.
- [24] Hofmann-Wellenhof, B.: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*. Springer Science and Business Media, 2007, ISBN 3211730176.
- [25] Hughes, P. C.: *Spacecraft Attitude Dynamics*. 2004, ISBN 0-486-43925-9.
- [26] Langley, R. B.: *An Alternative and Complement to GPS*. [Online; navštíveno 15.10.2017].
URL <http://gpsworld.com/innovation-glonass-past-present-and-future/>

- [27] Mai, T.: *Global Positioning System*. [Online; navštíveno 15.10.2017].
URL <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS.html>
- [28] Navipedia: *Satellite Coordinates Computation*. [Online; navštíveno 5.12.2017].
URL http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Satellite_Coordinates_Computation#ci
- [29] Navipedia: *The reference for Global Navigation Satellite Systems*. [Online; navštíveno 8.3.2018].
URL http://www.navipedia.net/index.php/Main_Page
- [30] Nesládek, V.: *GNSS - Global Navigation Satellite System*. [Online; navštíveno 20.3.2018].
URL <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/>
- [31] Rapant, P.: *Družicové polohové systémy*. VŠB-TU Ostrava, 2002, ISBN 80-248-0124-8.
- [32] Scheirich, P.: *Základy astronavigace*. [Online; navštíveno 14.10.2017].
URL http://sajri.astronomy.cz/astronavigace/zaklady_astronavigace.pdf
- [33] Tinder, R. F.: *Relativistic Flight Mechanics and Space Travel: A Primer for Students, Engineers and Scientists*. Morgan and Claypool Publishers. p. 33, 2007, ISBN 978-1-59829-130-8.
- [34] Visser, H.: *GNSS Improvements for Offshore Applications*. [Online; navštíveno 16.10.2017].
URL <https://www.hydro-international.com/content/article/gnss-improvements-for-offshore-applications>
- [35] WIKIPEDIA: *Globální družicový polohový systém*. [Online; navštíveno 11.12.2017].
URL <https://www.rcprofi.cz/g3-ray-li-pol-3000mah-7-4-30-60c-prijimacovy-pack-22-2wh.html>
- [36] WIKIPEDIA: *Navigace*. [Online; navštíveno 12.10.2017].
URL <https://cs.wikipedia.org/wiki/Navigace>
- [37] WIKIPEDIA: *Orientační bod*. [Online; navštíveno 1.12.2017].
URL https://cs.wikipedia.org/wiki/Orienta%C4%8Dn%C3%AD_bod
- [38] WIKIPEDIA: *Quadcopter*. [Online; navštíveno 11.12.2017].
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Quadcopter>
- [39] Yan, L.: *China's BeiDou to overtake GPS*. [Online; navštíveno 30.12.2017].
URL <http://www.ecns.cn/2017/04-07/252420.shtml/>
- [40] Čižmár, J.: *Modelling of Dynamic Features of the Vertical gyros*. Cybernetic Letters – Informatics, 2006, ISBN 1802-3525.

- [41] Čábelka, M.: *Úvod do GPS*. [Online; navštíveno 30.12.2017].
URL <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps/>

Přílohy

Příloha A

Obsah CD

dokumentace: Zdrojové soubory tohoto textu psaného v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$.

data\testy: Soubory ze statického a dynamického testování pro aplikaci u-Center.

data\sw: Aplikace potřebné pro spuštění testů a záznamového zařízení.

data\src: Zdrojový kód systému pro Arduino a použité knihovny.

data\vystup: Data s výstupními hodnotami ze záznamového zařízení.

projekt.pdf: Soubor pdf obsahující technickou zprávu v podobě odevzdané do informačního systému FIT.

readme.txt: Obsah CD a popis postupu pro spuštění přiloženého programu, testů a instalace aplikací.